



ÉCOLOGIE &  
ENVIRONNEMENT

Prospectives

**CNRS**

**Écologie &  
Environnement**

2023



Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023

# Sommaire

AVANT-PROPOS	3
<b>GRANDES QUESTIONS EN ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION</b>	7
QU'EST-CE QUE LE VIVANT ?	9
SEXE, GENRE, ESPÈCE ET ÉVOLUTION	23
LE PASSÉ (DE LA DIZAINE AU MILLIARD D'ANNÉES) AU SERVICE DU PRÉSENT ET DU FUTUR	37
MICRO ET MACROÉVOLUTION : COMMENT L'UNE PEUT-ELLE ÉCLAIRER L'AUTRE ?	51
À LA FRONTIÈRE ENTRE ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION	65
<b>LES GRANDS DÉFIS ENVIRONNEMENTAUX</b>	77
ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ : DE LA PERCEPTION À L'ACTION	79
POLLUTION ET ÉCOSYSTÈMES	91
MIGRATIONS HUMAINES ET IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT NON-HUMAIN	105
AGROÉCOLOGIE & CHOIX ALIMENTAIRES : PRATIQUES, IMPACTS ET TEMPORALITÉS	113
SANTÉ ET ENVIRONNEMENT	129
<b>LES ÉCOSYSTÈMES EN CRISE</b>	145
SOCIO-ÉCOSYSTÈMES EN CRISE : LE MILIEU URBAIN, LE LITTORAL	147
RÉTROACTION DU FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE VERS LE FONCTIONNEMENT GLOBAL	157
LES PÔLES	165
<b>LES DÉFIS MÉTHODOLOGIQUES ET LEURS OUTILS</b>	173
OBSERVATION À DISTANCE	175
DONNÉES, APRÈS L'ACQUISITION	189
LES DÉFIS MÉTHODOLOGIQUES DU PHÉNOTYPAGE HAUT DÉBIT	199
<b>SCIENCES ET SOCIÉTÉ : DU SAVOIR À L'ACTION</b>	209
APPROCHE GLOBALE DES ÉTHIQUES DANS LES RELATIONS SOCIÉTÉS/NATURE	211
DIFFUSION ET PROMOTION DE LA MÉTHODE SCIENTIFIQUE ET DES SCIENCES	221
CO-CONSTRUCTION DES SAVOIRS	233
GLOSSAIRE	242
<b>ANNEXES</b>	245





# Avant-propos

La parution des prospectives 2023 du CNRS en Écologie et Environnement coïncide avec un nombre sans précédent de crises environnementales dans l'histoire de l'humanité. Parmi ces crises figurent l'épidémie de Covid-19, les records de température, le déclin de la biodiversité, les méga-feux, et bien d'autres encore.

Cette quatrième édition des prospectives, pilotée par CNRS Écologie & environnement, revêt par conséquent une importance capitale. Au fil des années, le CNRS s'est affirmé comme un acteur de premier plan dans les domaines de l'écologie, de la biodiversité, des sciences de l'évolution et des interactions entre l'humain et son environnement (socio-écosystèmes). Cela a été rendu possible grâce à une recherche de haut niveau, reconnue à l'échelle internationale, ainsi qu'à un engagement soutenu de la part de ses communautés et de ses partenaires académiques.

La section thématique de ce recueil, articulée autour de cinq axes de réflexion, reflète la diversité des questions et des problématiques qui animent les chercheurs et les chercheuses œuvrant en écologie et en environnement. Des interrogations fondamentales sur la nature du vivant aux défis majeurs en matière environnementale, en passant par des considérations méthodologiques et des réflexions sur la nécessité d'intensifier les interactions entre les sciences et la société, chaque thème contribue à un puzzle scientifique complexe. L'objectif ultime de ce puzzle consiste à produire de solides données scientifiques afin de faciliter la transition du savoir vers l'action, en vue de chercher des solutions aux crises environnementales et, par extension, de venir en appui des décideurs.

C'est dans cette démarche intégrée que réside la singularité de l'approche de CNRS Écologie & environnement dans la coordination de ces prospectives. Cette originalité repose sur la convergence des approches émanant des sciences de la Terre, des sciences de la vie et des sciences humaines et sociales, ayant conduit à la création de l'Institut. L'objectif sous-jacent est de promouvoir les sciences de l'environnement en tant que domaine scientifique intégré, destiné à répondre à la complexité des enjeux résultant des accélérations des changements mondiaux et de la globalisation des activités humaines. Les visions successives des directeur et directrices de l'Institut, à savoir Bernard Delay, Françoise Gaill et Stéphanie Thiébault, ont contribué au développement d'une écologie scientifique qui appréhende le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes à diverses échelles temporelles et spatiales, intégrant les dimensions socio-écosystémiques. Cette approche, initialement fondée sur l'écologie globale, s'est avérée novatrice en son temps et constitue désormais les fondements de la science de la durabilité, adoptée par de multiples institutions et organismes de recherche à travers le monde.

La science de la durabilité a pour dessein d'approfondir la compréhension des mécanismes en jeu, des capacités de résilience et d'adaptation (ou de non-adaptation) des socio-écosystèmes. Son but ultime réside dans la promotion de la transition du savoir vers des actions concrètes, tout en éclairant les décideurs et les acteurs locaux. Cette approche requiert une transdisciplinarité, englobant une gamme étendue d'acteurs de la société, allant des parties prenantes aux décideurs, depuis la formulation des questions de recherche jusqu'à la mise en œuvre des résultats. Cependant, il est important de noter qu'un grand nombre de scientifiques travaillent sur des thématiques de durabilité, sans nécessairement embrasser cette nouvelle approche transdisciplinaire qui sous-tend cette science de la durabilité. Ceci constitue un point de vigilance essentiel, souvent source de confusion dans la communauté.

Il est indéniable qu'au fil des décennies, CNRS Écologie & environnement et ses partenaires, par le biais d'initiatives telles que les Zones Ateliers (ZA) et les Observatoires Hommes-Milieux établis et soutenus par l'Institut, ont acquis une expertise unique dans cette nouvelle approche, laquelle constituera le cœur du Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) *Transform*. Cette expertise demeure inégalée, tant sur le plan national qu'international.

Depuis les premières prospectives du CNRS en Écologie et Environnement tenues à Rennes en 2009, le monde a connu des évolutions substantielles, le concept d'Anthropocène a émergé, les agendas politiques se sont ajustés avec l'adoption des Objectifs de Développement Durable (ODD) et la nouvelle stratégie nationale pour la biodiversité. Le rôle des scientifiques est devenu de plus en plus décisif pour répondre aux urgences sociales, économiques et environnementales.

Les premières prospectives ont introduit de nouvelles notions telles que l'écologie chimique et l'écologie de la santé. Les ateliers davantage transversaux organisés à Avignon en 2012 et à Bordeaux en 2017 ont rassemblé respectivement 350 et 550 participants et participantes. Les travaux menés lors de ces prospectives se sont avérés innovants, tant du point de vue conceptuel que sur le plan des infrastructures. Ils ont influencé la programmation de la recherche à tous les niveaux.

Ces initiatives ont en effet donné lieu à la création de Groupements de recherche (GDR) et de Réseaux thématiques (RT), ainsi qu'à l'établissement de laboratoires et de projets internationaux. Elles ont renforcé les infrastructures de recherche, soutenu des années thématiques et des projets exploratoires de premier soutien (PEPS) au sein de l'Institut Écologie et Environnement et de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI). Elles ont contribué à orienter la programmation de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et du Belmont Forum, tout en suscitant des perspectives ciblées sur des thèmes émergents tels que l'ADN environnemental, l'épigénétique et les recherches sur les îles isolées. Elles ont également favorisé la dissémination des connaissances à travers diverses publications. Par exemple, la revue issue de l'atelier *One Health* de 2017 demeure l'un des articles les plus cités dans ce domaine, jouissant d'un accueil favorable tant parmi la communauté scientifique que parmi les décideurs politiques, particulièrement suite à la crise de la Covid-19.

Les journées de prospectives des 12, 13 et 14 octobre 2022 ont quant à elles réuni plus de 200 participants et participantes à La Rochelle, et plus de 400 personnes ont pris part au séminaire de restitution en janvier 2023. L'Institut et son Conseil scientifique ont choisi de concentrer les prospectives de 2022/2023 sur les grandes questions en écologie et évolution, les grands défis environnementaux, les écosystèmes en crise, les défis métho-

---

dologiques et leurs outils, ainsi que les relations entre les Sciences et la Société en vue de la mise en œuvre de solutions.

Au sein des différentes sections, il est manifeste que l'interdisciplinarité est fréquemment mise en avant par la communauté scientifique comme une approche cruciale à renforcer pour relever certains défis. Un échange avec la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires du CNRS, ainsi qu'avec l'ensemble des instituts, permettra de capitaliser sur une expérience déjà riche. Des sujets tels que le genre et les sexes, l'origine de la vie, les effets synergiques, les environnements extrêmes et les enjeux alimentaires sont réexaminés.

Il est évident que les nouveaux programmes nationaux de recherche, Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), jouent un rôle significatif dans ce contexte. Ces programmes sont en train de remodeler concrètement le paysage de la recherche pour la décennie à venir, et nombre des priorités évoquées ici trouveront un écho dans les projets mis en œuvre au sein de ces programmes. Ces PEPR illustrent sans équivoque notre aptitude à collaborer au sein des instituts du CNRS et entre les différentes entités pour affronter des défis complexes.

Une idée fondamentale ressort de la majorité des présentations : l'importance vitale des suivis à long terme. Cette conviction partagée accentue la nécessité d'une meilleure coordination et structuration de ces suivis, tout particulièrement ceux consacrés au vivant, qu'il s'agisse d'animaux, de végétaux ou d'êtres humains. Actuellement, CNRS Écologie & environnement mène une réflexion pour définir la meilleure approche visant à renforcer ces suivis, en particulier ceux qui ne bénéficient pas encore d'une structure nationale bien définie ni de soutien conséquent.

Enfin, comme vous pourrez le constater, l'exploration du fonctionnement et de la dynamique des socio-écosystèmes revient régulièrement dans les différents chapitres. Les discussions relatives aux socio-écosystèmes occupent une place centrale dans les activités de CNRS Écologie & environnement. Tout comme le concept de «One Health», l'intérêt pour les socio-écosystèmes est en pleine expansion. Ils représentent un niveau d'intégration supérieur, mais leur complexité rend leur étude particulièrement ardue. En France, les Zones Ateliers (ZA) et les Observatoires Hommes-Milieus (OHM), deux des quatre piliers des infrastructures de recherche de CNRS Écologie & environnement (voir annexes), capitalisent sur plusieurs décennies d'études consacrées aux socio-écosystèmes et seront renforcés pour permettre aux équipes de recherche d'approfondir ces champs de recherche.

Ces prospectives 2023 du CNRS en Écologie et Environnement visent à renforcer la recherche fondamentale de haut niveau, qu'elle soit disciplinaire, interdisciplinaire ou transdisciplinaire, en vue de fournir des solutions scientifiques aux défis complexes et urgents auxquels font face notre planète et nos sociétés.

À travers cet ouvrage, nous tenons à remercier très chaleureusement l'ensemble des personnes qui se sont activement investies dans ce travail de prospectives, largement perturbé par la crise Covid.

**Stéphane Blanc**  
Directeur de CNRS  
Écologie & environnement

**Agathe Euzen**  
Directrice-adjointe de CNRS  
Écologie & environnement

**Patricia Gibert,**  
Présidente du conseil  
scientifique de CNRS  
Écologie & environnement



Idotée juvénile vue en  
microscopie confocale.  
Les spermates (formes  
sphériques en vert) adhèrent  
à la cuticule de l'animal. Un  
détail montre l'accumulation  
de ces gamètes sur les pattes.  
Crédit : © Sébastien COLIN /  
Max Planck Institute For Biology  
/ Station biologique de Roscoff /  
CNRS / SU / CC BY-NC-SA

20  $\mu$ m

Grandes  
questions

en

**écologie  
& évolution**

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023

# Qu'est-ce que **le vivant ?**

Auteurs : Purificación Lopez-García (ESE), Jean-Michel Drezen (IRBI), Philippe Jarne (CEFE)

Contributeurs : Mart Krupovic (I. Pasteur), Philippe Nghé (CBI-ESPCI), Thomas Lenormand (CEFE), Sylvain Charlat (LBBE), Téléspore Sime-Ngando (LMGE), Adrienne Kish (MCAM), Geneviève Prévost (EDYSAN)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Étudier les branches méconnues de l'arbre du vivant et des virus et améliorer les approches phylogénomiques pour inférer les états ancestraux et l'histoire évolutive du vivant
- ▶ Décloisonner l'étude des micro- et macro-organismes pour élaborer une théorie unifiée de l'écologie et de l'évolution de l'ensemble du vivant et développer des outils de modélisation pour comprendre l'émergence des propriétés essentielles du vivant
- ▶ Soutenir la recherche fondamentale en biologie-écologie-évolution sur l'origine de la vie en renforçant l'interdisciplinarité et l'interaction avec les autres instituts



## Introduction

Les objectifs de l'atelier comprenaient l'analyse des définitions et propriétés essentielles du vivant, selon différents points de vue, et l'établissement d'une définition opérationnelle qui délimite quand un système chimique devient biologique, avec la possibilité d'aborder toutes les méthodes et modèles, et qui permettent d'appréhender les origines du vivant comme transition évolutive majeure tout en retraçant son (ses) histoire(s).

## État des lieux

L'origine de la vie, depuis ses racines chimiques, est à l'origine de l'ensemble de la biodiversité et constitue, pour ainsi dire, l'acte fondateur de la biologie. Pourtant, de manière paradoxale, les biologistes, qui étudient les organismes vivants, c'est-à-dire des unités de vie, évitent le plus souvent de définir la vie. En effet, définir le vivant nécessite d'explorer ce qui le différencie du non-vivant, amenant à quitter le cercle de la biologie et à concevoir ce problème dans une perspective interdisciplinaire, impliquant la chimie ou la physique. Il apparaît donc nécessaire de convenir de ce qu'est une définition en sciences naturelles. S'agit-il de lister plus ou moins exhaustivement des caractéristiques descriptives des organismes ou bien d'en extraire, par comparaison dans l'arbre du vivant, les propriétés essentielles qui leur sont communes ? Peut-on identifier ces propriétés universelles du vivant et, si oui, y en a-t-il une qui soit plus importante, fondatrice, définitive ? Si la philosophie des sciences peut éventuellement contribuer au débat épistémologique (Malaterre *et al.*, 2022), la biologie doit, de manière très pragmatique, s'emparer de la question et proposer une définition (pour le moins) opérationnelle du vivant.

Pourquoi ? Une première raison est comme souvent pédagogique, en particulier afin d'éviter que des définitions non scientifiques occupent l'espace public. Plus profondément, une définition scientifique opérationnelle est requise pour déterminer l'origine de la vie, c'est-à-dire quand un système chimique devient biologique, et pour distinguer les objets vivants des objets qui ne le sont pas dans le contexte de la recherche de la vie ailleurs dans l'univers. Penser la barrière entre vivant et non-vivant devient urgent dans un contexte scientifique et sociétal fortement intéressé par la question, comme en témoignent le

nombre grandissant de programmes de recherche de type « origines » et l'abondance d'articles, conférences et documentaires de vulgarisations dédiés au sujet. D'une part, la recherche spatiale a conduit à la découverte croissante de nombreux systèmes solaires abritant des exoplanètes, dont un certain nombre sont telluriques et pourraient, comme la Terre, disposer d'eau liquide en surface, mais aussi à la découverte de nombreux composés organiques, dont des acides aminés, dans des météorites, des comètes et des objets planétaires et satellitaires (Ehrenfreund *et al.*, 2011 ; Gargaud *et al.*, 2013). Astrophysiciens et astrochimistes, tout comme le grand public, s'interrogent donc naturellement sur la possibilité de l'existence d'une forme de vie ailleurs. Si l'on retrouve des conditions environnementales similaires à celles de la Terre primitive dans une autre planète, on peut se demander si une forme de vie a pu émerger. Il s'agit donc en particulier de différencier objets vivants et simples amas réactionnels chimiques. D'autre part, cette même question se pose pour l'origine de la vie sur Terre. Au-delà des aspects historiques, qui peuvent être étudiés rétrospectivement jusqu'à un certain point par la phylogénie moléculaire à travers la comparaison des protéines et des gènes conservés universellement (Gargaud *et al.*, 2013 ; Scornavacca *et al.*, 2020), l'étude des aspects plus mécanistes, tels l'établissement de réseaux chimiques autocatalytiques ou la mise en place de mécanismes de sélection et d'évolution à partir des molécules organiques (peptides, petits ARNs...), est de plus en plus abordable en laboratoire par le biais des approches de la chimie et de la biologie de synthèse. Si la question est interdisciplinaire, elle doit interpeler en premier lieu la biologie : quand est-ce qu'un système chimique complexe devient biologique ?



## Définitions de la vie ou du vivant

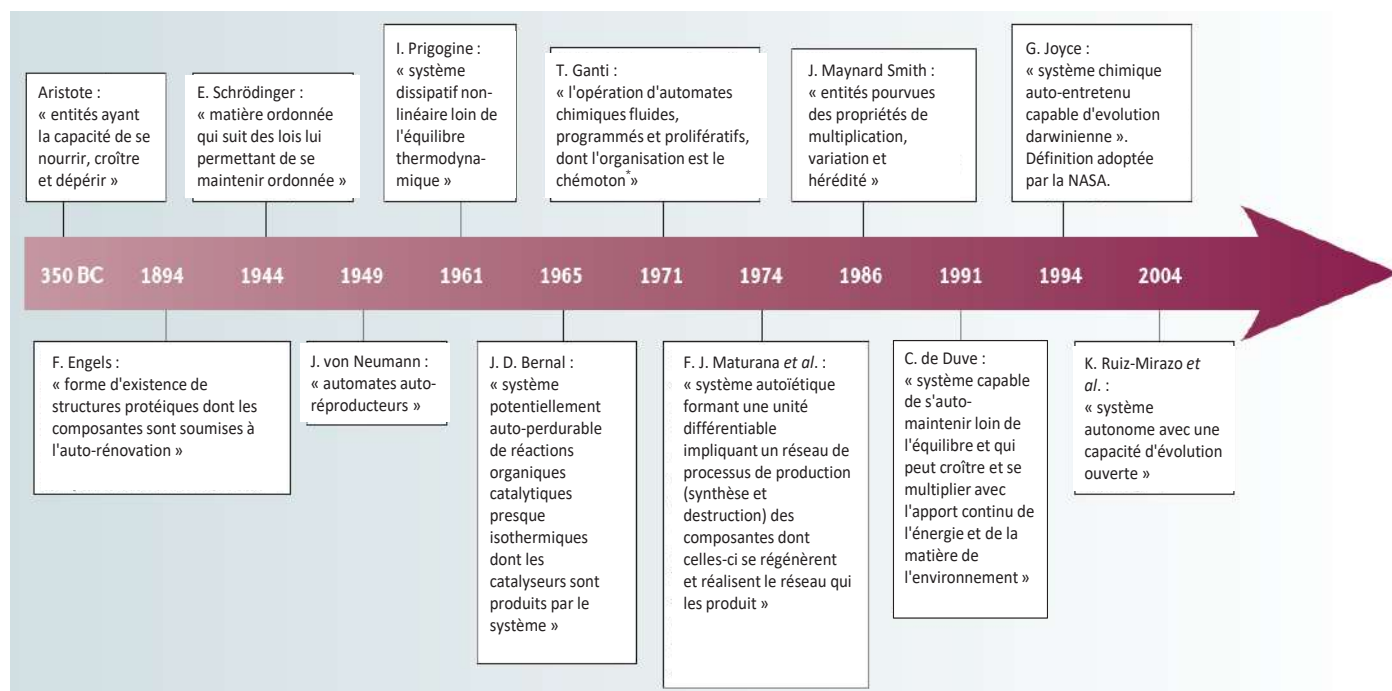
Une définition conceptuelle devrait permettre de clarifier la, ou les, propriétés essentielles de la vie ou du vivant et d'élaborer un scénario plausible du passage du monde chimique au monde vivant. D'une certaine manière, la vie est la propriété fondamentale du vivant, les organismes vivants n'étant que des unités de vie. Peut-on identifier une ou des propriétés fondamentales sous-jacentes ? Une définition opérationnelle est forcément moins ambitieuse puisqu'il s'agira surtout d'identifier et de s'accorder sur des indices ou des indications de vie, en situation d'information limitée, par exemple en exobiologie. Idéalement, une définition de la vie devrait allier ces deux aspects.

Historiquement, plusieurs définitions de la vie ou du vivant ont été proposées (Figure 1), surtout à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, suite à l'établissement de la théorie de l'évolution des espèces par sélection naturelle par Charles Darwin et à un moment où les progrès de la chimie organique et de la biochimie permettaient d'envisager un processus de complexification chimique aboutissant à l'émergence de systèmes biologiques.

Ces définitions mettent globalement deux propriétés en avant et, poussant à l'extrême, l'une ou l'autre d'entre elles comme fondamentale et donc, primordiale dans le contexte d'apparition de la vie. D'un côté, certaines définitions considèrent la capacité d'auto-maintien comme primordiale. Les organismes vivants sont vus comme des systèmes hors équilibre thermodynamique, qui créent de l'ordre à partir du chaos moyennant une source d'énergie. De l'autre côté, on a des définitions basées sur la capacité d'évolution darwinienne, qui découle de la capacité à s'auto-reproduire en répliquant de l'information génétique dont les mutations engendrent des variants sur lesquels la sélection naturelle peut agir.

Ces deux définitions mettent en avant l'une ou l'autre des deux propriétés extrêmement imbriquées dans la cellule qui est souvent considérée comme l'unité fondamentale du vivant : d'une part, le métabolisme, c'est-à-dire la capacité à transformer de la matière et de l'énergie, et, d'autre part, la génétique, la capacité à stocker de l'information codée sur

Figure 1.  
Quelques définitions de la vie ou du vivant proposées à travers l'histoire (Moreira & López-García, 2009).



\* Chémoton - l'unité fondamentale des systèmes vivants consistant dans trois systèmes autocatalytiques fonctionnellement dépendants : un réseau métabolique chimique, un polymère matriciel et un sous-système membranaire qui les encercle

des hétéropolymères (les acides nucléiques) qui peut être transférée à la descendance via une réplication semi-conservative. L'information génétique peut être exprimée au sein de la cellule avec le concours du métabolisme pour fabriquer des protéines et d'autres molécules qui vont assurer des structures ou la catalyse. L'ensemble « métabolisme et système génétique » est entouré par une membrane formant un compartiment qui permet l'échange semi-perméable avec l'extérieur en délimitant des individus qui sont autant d'unités de sélection.

D'autres définitions, plus intégratives, impliquent ces deux propriétés simultanément, voire la présence de compartiments. La définition la plus répandue est celle proposée par Gerald Joyce, retenue par la NASA : les organismes vivants sont des systèmes chimiques auto-entretenus capables d'évolution darwinienne. Elle allie métabolisme et génétique, mais n'est pas explicite sur la présence de compartiments. Elle ouvre ainsi la voie à ce que des réseaux métaboliques de surface (par exemple, sur des

minéraux dans des systèmes hydrothermaux), associés à un système de codage, puissent être considérées comme vivants. Toutefois, pour que la sélection naturelle puisse agir sur des réseaux auto-catalytiques associés à des réplicateurs, il faut des unités de sélection qu'on imagine mal en absence d'un compartiment (« véhicule » de l'information). Ainsi, cette définition peut associer, de manière certes implicite, la présence d'unités spatialisées dans une membrane.

On voit donc qu'une définition du vivant peut s'appuyer sur un processus, l'évolution darwinienne, en faisant l'économie des processus métaboliques sous-jacents, mais qu'opérationnellement, elle requiert de tels processus qui, hors équilibre thermodynamique, maintiennent activement l'ordre face à l'entropie autrement grandissante de tout système physique. Elle renvoie aussi à la distinction fondamentale, popularisée par Richard Dawkins, entre réplicateur (génétique) et véhicule d'information (métabolique et compartiment), et donc directement à la notion d'individu.

### Origine de la vie : de la chimie à la biologie

L'origine de la vie est une question profondément interdisciplinaire qui peut être abordée scientifiquement par deux approches convergentes. La première part de l'étude des briques élémentaires du vivant et explore comment elles peuvent interagir pour donner naissance à une chimie organique abiotique de plus en plus complexe tendant vers une biochimie minimale. Astrophysique, chimie et géologie y contribuent à travers l'étude de la formation des systèmes solaires, de la chimie prébiotique et des conditions géochimiques environnementales qui régnaient quand la vie est apparue sur Terre (Gargaud *et al.*, 2013 ; Scharf *et al.*, 2015). L'autre approche, complémentaire, part de l'étude comparative de l'ensemble de la biodiversité, par le biais de l'analyse de génomes des organismes de l'arbre du vivant (Figure 2), en essayant de déterminer ses limites physico-chimiques, ses propriétés fondamentales et son histoire évolutive (Gargaud *et al.*, 2013 ; Krupovic *et al.*, 2020). On infère ainsi l'existence d'un dernier ancêtre universel (LUCA, *last universal common ancestor*) ou cenancêtre, commun aux organismes des trois domaines du vivant (archées, bactéries, eucaryotes). Cet

ancêtre avait les mêmes fondements biochimiques, notamment le même choix d'acides aminés constituant les protéines et de nucléotides faisant partie des acides nucléiques, et utilisait le même code génétique que les organismes actuels. De cet ancêtre, déjà complexe et possédant plusieurs centaines de gènes, dérivent les deux lignées procaryotes, archées et bactéries. Les eucaryotes, quant à eux, constituent un domaine secondaire qui a évolué environ deux milliards d'années plus tard suite à l'intégration d'une symbiose archée-bactérie. Déjà présents chez LUCA, la machinerie de traduction, le ribosome, qui est un ribozyme, et l'ATPase de membrane permettant de générer de l'ATP à partir d'un gradient chimiosmotique sont parmi les éléments biologiques les plus conservés dans le vivant. À partir de ces éléments, des approches moléculaires comparatives peuvent encore permettre d'envisager des étapes d'évolution encore plus précoces, mais on ne peut plus les reconstruire par phylogénie moléculaire. Il y a donc un fossé temporel entre LUCA et ses prédécesseurs immédiats et les toutes premières formes de vie, et entre celles-ci et l'origine véritable de la vie (Figure 3).

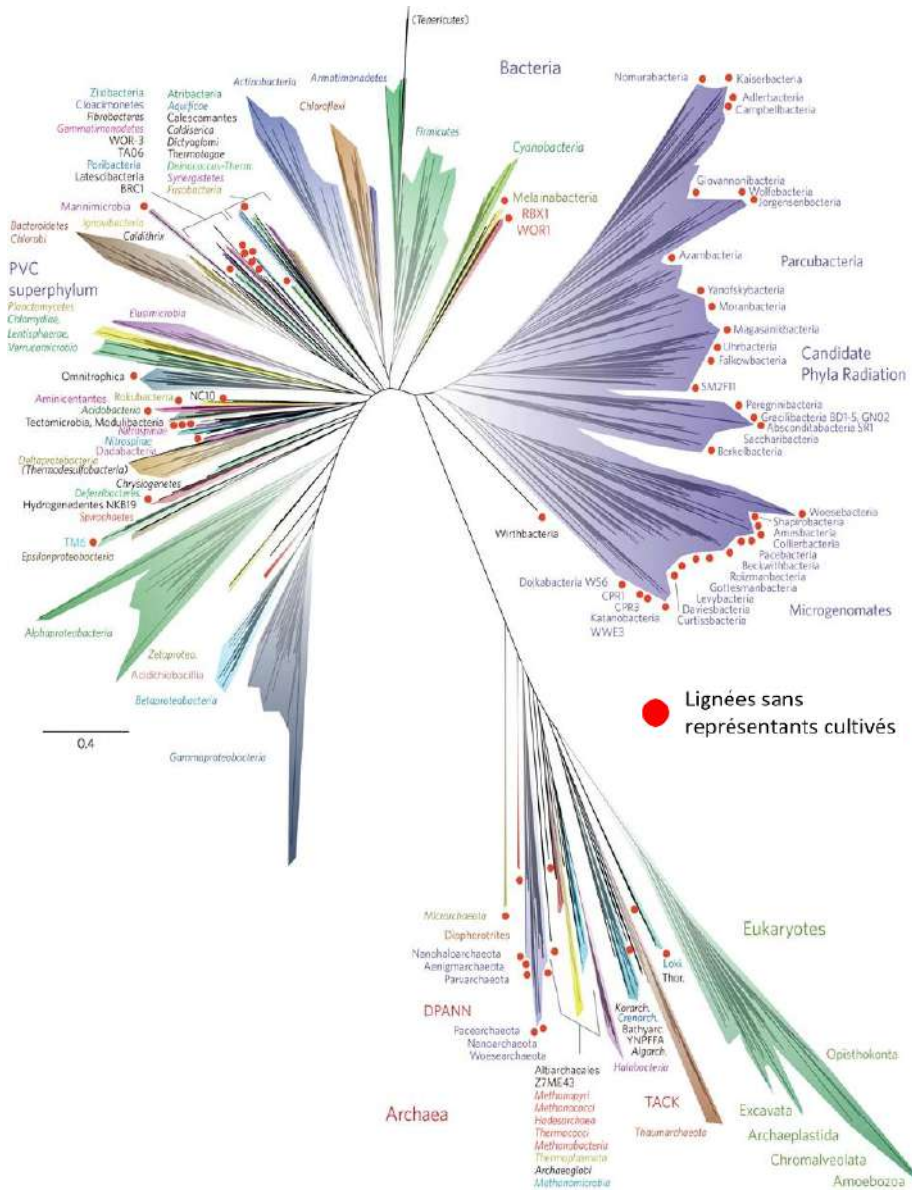


Figure 2. Une vision mise à jour de l'arbre du vivant. Cet arbre phylogénétique, reconstruit en utilisant des protéines ribosomiques conservées dans le vivant (Hug *et al.*, 2016), montre les relations de parenté entre représentants des grands taxons (niveau *phylum*) des trois domaines du vivant. Il illustre bien que la plus grande partie de la biodiversité correspond au monde microbien, notamment au domaine des bactéries. Mais la plupart des grands taxons procaryotes n'ont pas de représentants cultivés et ne sont connus qu'à travers leurs génomes assemblés à partir de métagénomés ou par des approches « *single-cell* ».

Comment la vie a-t-elle émergée sur notre planète ? Historiquement, en fonction de la propriété du vivant, c'est-à-dire de la définition de la vie (énergie/métabolisme vs. évolution darwinienne), mise en avant par les chercheurs comme primordiale, on dispose de deux grandes catégories d'hypothèses sur l'origine de la vie (Podolsky, 1996 ; Fry, 2000). Les unes (« métabolistes ») postulent que des réseaux auto-catalytiques sont apparus en premier, avant qu'un système génétique n'apparaisse, les autres (« génétistes ») qu'une molécule auto-répliquative est apparue en premier, que l'on pourrait déjà qualifier de vivante, avant qu'un métabolisme

ne s'accrète autour. Une sorte de dialectique s'est ainsi mise en place entre des modèles prônant le métabolisme d'abord et ceux favorisant la génétique d'abord. Dans les premiers, on

Figure 3. Origine de la vie : de l'évolution chimique à l'évolution biologique. Ce processus a eu lieu quelque part entre le moment où des océans d'eau liquide se sont formés – associés à l'apparition des premiers continents – il y a environ 4,2 milliards d'années et le moment où les traces de vie les plus anciennes non soumises à controverse sont attestées (~3,5 milliards d'années). Ces traces correspondent à des stromatolites fossiles dans la région de Pilbara (Australie) qui impliquent la présence de communautés complexes comprenant des bactéries photosynthétiques probablement anoxygéniques, suggérant que le temps du dernier ancêtre commun était déjà révolu. © P Lopez-Garcia



trouve des idées d'émergence de la vie à partir des cycles réactionnels hétérotrophes, dans une « soupe » primitive riche en briques organiques d'origine abiotique, ou autotrophes, sur des surfaces minérales en contexte hydrothermal où le CO<sub>2</sub> est fixé pour former les molécules organiques du vivant. D'ailleurs, on peut recréer des voies de fixation du carbone utilisées aujourd'hui par des cellules abiotiquement (Muchowska *et al.*, 2020). Les seconds types de modèles incorporent l'idée d'une molécule auto-répliquative portant de l'information génétique. Cette idée d'un réplicateur initial auto-suffisant était relativement peu élaborée au départ de la réflexion, mais a pris de l'ampleur avec les premières versions de l'hypothèse du monde à ARN.

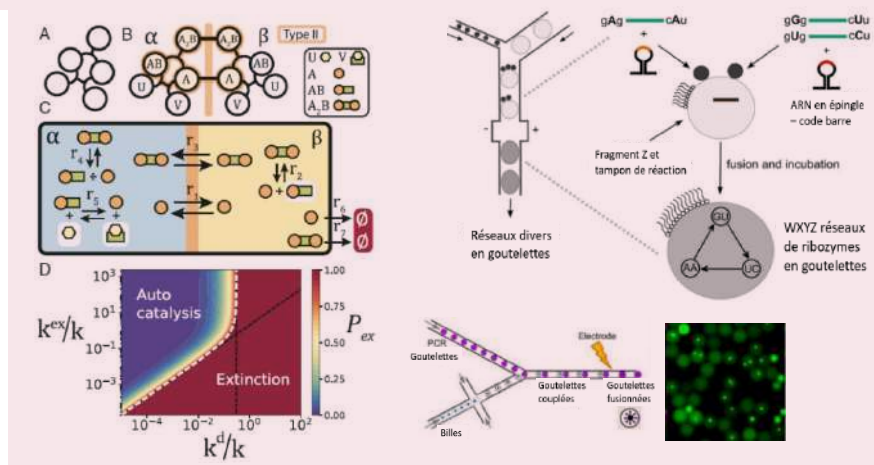
Si la découverte des ARNs catalytiques a offert une solution apparente à la dichotomie de type œuf-poule du « métabolisme versus génétique » en proposant que les premières formes de vie étaient des ARNs auto-catalytiques, précédant l'apparition des protéines, l'idée d'un monde à ARN pur est confrontée à de sérieux problèmes (Gargaud *et al.*, 2013). Non seulement l'ARN est plus instable que l'ADN, et sa synthèse est difficile dans les conditions environnementales de la Terre primitive, même si des voies de synthèse abiotiques de nucléotides ont pu être proposées récemment (Powner *et al.*, 2009 ; Xu *et al.*, 2020), mais la présence d'acides aminés et petits peptides est inéluctable de par leur universalité (Ehrenfreund *et al.*, 2011 ; Danger *et al.*, 2012 ;

## ENCADRÉ 1

### Synthétiser et modéliser la vie

La modélisation *in silico* et l'évolution expérimentale en laboratoire peuvent permettre de reproduire l'émergence de propriétés du vivant à partir de briques plus élémentaires. Les approches théoriques et la modélisation existent depuis plusieurs décennies, par exemple avec l'idée de co-évolution à trois composantes (membrane – réseau auto-catalytique – réplicateur) de Tibor Ganti (Gánti, 1971), les automates de von Neumann (Von Neumann, 1949) ou le jeu de la vie de John Conway (Gardner, 1970). Depuis, la modélisation a été largement utilisée pour explorer des aspects plus concrets d'évolution de réplicateurs biologiques ou de cycles auto-catalytiques (Szostak *et al.*, 2001 ; Szathmáry, 2007 ; Nghe *et al.*, 2015). Dans le même temps, depuis les premières expériences SELEX d'évolution *in vitro* des ARNs, le volet expérimental et ses possibilités se sont considérablement élargis avec la possibilité de former des vésicules à plus ou moins haut débit (par exemple travaux de Jack W. Szostak) à travers, notamment, des systèmes microfluidiques couplés à l'imagerie fluorescente (Joyce & Szostak, 2018 ; Blokhuis *et al.*, 2020 ; Ameta *et al.*, 2022) (Figure 4). Ces deux approches seront amenées à se développer davantage dans les années à venir.

Figure 4. Synthétiser et modéliser la vie. À gauche, exemple de modélisation de l'effet de compartiments sur l'autocatalyse en absence (A) ou présence (B-C) de compartiments (Blokhuis *et al.*, 2020). À droite, exemple de mise en place d'un système expérimental de microfluidique pour analyser l'apparition de propriétés darwiniennes à partir de réseaux d'ARNs autocatalytiques (Ameta *et al.*, 2022). © P. Nghe





Öberg, 2016 ; Muchowska & Moran, 2020). De plus, les capacités catalytiques des ARNs sont limitées et incompatibles avec les réactions du métabolisme énergétique impliquant des atomes métalliques, ces derniers facilitant l'hydrolyse de l'ARN. Un autre problème classique est que, pour que des molécules d'ARN ne subissent pas une catastrophe répliquative (en l'absence d'enzymes avec capacité de correction, dès lors que le taux de mutation est assez élevé), elles doivent avoir une taille inférieure à ~100 nucléotides, alors qu'il faut au moins ~100 nucléotides pour coder une réplicase avec cette capacité – c'est le fameux paradoxe d'Eigen –. De plus, un ribozyme doit avoir une taille supérieure à 60-100 nucléotides qui lui permette d'adopter une configuration tridimensionnelle fonctionnelle et, donc, avoir une quelconque activité répliquative à l'ARN. Or, pour atteindre cette taille, il faut passer par des molécules plus petites. Plus encore, pour qu'un ribozyme puisse s'auto-réplicuer, il faut que la molécule soit repliée dans l'espace pour être fonctionnelle, ce qui est incompatible avec un rôle simultané de matrice pour la réplication. De ce fait, aucun ARN auto-réplicatif n'est connu, mais seulement des ARNs qui peuvent effectuer une catalyse croisée (Szostak *et al.*, 2001 ; Pavlinova *et al.*, 2022). Aujourd'hui, des versions d'un « monde à ARN » plus réa-

listes sont généralement favorisées, proposant la coexistence de l'ARN et de peptides et même la présence des deux dans des vésicules (Higgs & Lehman, 2015 ; Kun *et al.*, 2015 ; Pressman *et al.*, 2015 ; van der Gulik & Speijer, 2015 ; Joyce & Szostak, 2018). Ces dernières hypothèses convergent vers des visions plus « métabolistes », où des vésicules d'amphiphiles (par exemple, des hydrocarbures partiellement oxydés issus d'une synthèse hydrothermale), formant donc des compartiments, auraient servi d'autant de réacteurs chimiques entraînant l'apparition de réseaux auto-catalytiques primordiaux.

Pour l'heure, les modèles de coévolution des trois composantes (métabolisme, génétique, compartiment), dans un contexte de chimie prébiotique complexe, semblent donc les plus plausibles pour expliquer l'origine de la vie. On peut analyser les contraintes ayant porté sur les aspects historiques du passage inerte-vivant, même si les reconstruire fidèlement reste impossible. Il est possible, en revanche, de modéliser et de reproduire en laboratoire, via des expériences de chimie et de biologie de synthèse, l'apparition des propriétés évolutives des polymères répliquatifs et de réseaux auto-catalytiques, notamment dans des compartiments vésiculaires ou microfluidiques (Encadré 1).

## Une polémique : les virus sont-ils vivants ?

Les virus, comme beaucoup d'autres éléments génétiques égoïstes, sont des parasites génétiques stricts. Très abondants dans les écosystèmes et extraordinairement divers, ils jouent des rôles fondamentaux en écologie (par exemple, contrôle de populations, libération de nutriments cellulaires et accélération du cycle du carbone, maintien de la biodiversité...) et en évolution (course aux armements stimulant l'évolution cellulaire, accélération des taux d'évolution de gènes menant à l'innovation, véhicules de transfert horizontal de gènes...) (Koonin *et al.*, 2020). Les virus géants possèdent des génomes de grande taille et portent souvent des gènes d'origine cellulaire impliqués dans le métabolisme de l'hôte qui sont utiles lors de l'infection. On reconnaît actuellement six grands royaumes viraux ou « *realms* » qui ont, au minimum, autant d'origines évolutives indépendantes (Koonin *et al.*, 2020). Les lignées virales ont évolué à partir de molécules d'ARN ou d'ADN simple ou double-brin,

certaines partiellement homologues à des plasmides, qui se sont entourées d'une capsid permettant le transfert extracellulaire vers de nouveaux hôtes. Des études récentes, mettant en lumière des similarités de structure, ont montré que les protéines de capsides ont été recrutées à partir de diverses protéines d'origine cellulaire (Krupovic & Koonin, 2017). Par conséquent, l'origine de virus modernes, c'est-à-dire à capsid, résulte de molécules répliquatives égoïstes qui se seraient échappées de cellules (Figure 5). Même si certains virus ont une origine relativement récente, par exemple les *Nucleocytoviricota*, plusieurs lignées virales ont vraisemblablement évolué très précocement, peut-être même avant LUCA, à partir des toutes premières cellules (Krupovic *et al.*, 2019 ; Koonin *et al.*, 2020). L'origine des molécules répliquatives virales reste plus difficile à cerner ; certaines hypothèses, dans le contexte des modèles « génétique d'abord », proposent qu'elles faisaient partie d'un ensemble

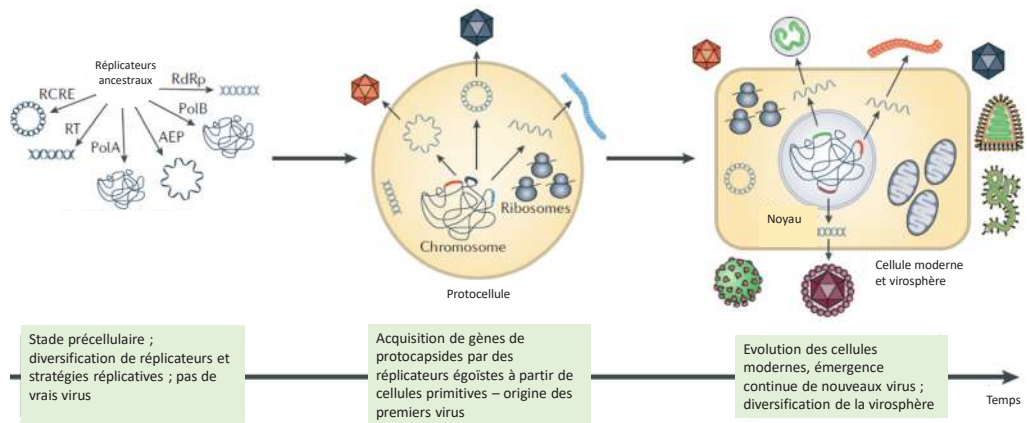


Figure 5. Scénario probable de l'origine indépendante de différents domaines viraux à partir de réplicateurs, dont certains ont pu être très anciens, ayant recruté des protéines cellulaires pour constituer leurs capsides (Krupovic et al. 2019).

de réplicateurs primordiaux dont quelques-uns auraient formé le génome cellulaire et d'autres, des proto-virus précédant l'acquisition de la capside. Les virus géants, parasitant des eucaryotes, sont apparus bien plus tard et leur origine a été un sujet de controverse (Encadré 2).

Les virus sont au centre d'un débat : sont-ils vivants ou pas ? (Moreira & López-García, 2009 ; Koonin & Starokadomsky, 2016 ; van Regenmortel, 2016 ; Selosse, 2022). En réalité, tout dépend de la définition retenue pour la vie ou le vivant. Empruntant le métabolisme cellulaire pour leur réplication et la fabrication de ses composantes, les virus sont incapables de transformer de la matière et de l'énergie par eux-mêmes. Par conséquent, pour des définitions « métabolistes », les virus ne sont pas vivants. Ils sont aussi exclus de la définition de la NASA, car ils ne peuvent pas s'auto-entretenir. Néanmoins, certains scientifiques considèrent qu'un virus s'auto-entretient pourvu que l'on considère sa cellule hôte comme son environnement dans le cadre du concept de « phénotype étendu » ; le virus manipule son hôte en lui « faisant faire » des tâches qui lui sont favorables. Le virus authentique ne serait alors pas la particule, mais la cellule complètement transformée par le programme du virus pour fabriquer de nouvelles particules, constituant ainsi une usine virale « la virocellule ». Cependant, définir un parasite

comme un parasite et son hôte est sujet à discussion. Le cas des virus serait dans ce sens comparable à celui de parasites cellulaires ou même d'organismes à vie libre qui dépendent étroitement de leur écosystème (par exemple, un lion dépendant de la présence de gazelles). Toutefois, il convient de distinguer les concepts de dépendance et d'autonomie. Si les organismes à vie libre dépendent de leur écosystème et les parasites cellulaires de leurs hôtes, ils sont autonomes ou gardent un degré plus ou moins important d'autonomie (auto-reproduction, transformation de la matière et de l'énergie). En revanche, les virus manquent d'autonomie, car ils ne sont pas capables d'exprimer par eux-mêmes les gènes qu'ils portent. On pourrait d'ailleurs faire la même remarque pour les gènes ou les génomes ; ils ne seraient pas non plus vivants à eux seuls et seraient des entités biologiques qui participent à la structure vivante qu'est la cellule. Pour les définitions « génétistes », les virus sont souvent considérés comme vivants, puisqu'ils évoluent. Cependant, l'évolution darwinienne implique l'auto-réplication, ce dont les virus ne sont pas capables puisque ce sont les cellules hôtes qui expriment les gènes viraux. Il serait toutefois possible de définir le vivant comme tout ce qui évolue (par soi-même ou par un agent externe). Une définition de cette nature permettrait *in fine* de considérer les virus comme vivants, mais aussi les virus informatiques, les langues, la technologie... (Moreira & López-García, 2009), ce qui ne ferait qu'élargir le débat à d'autres entités qui, certes, évoluent (à travers l'action de l'homme), mais en l'éloignant de la réalité biologique.

## ENCADRÉ 2

### L'origine de virus géants

Les Mimivirus et autres virus géants parasitent des cellules eucaryotes et ont de grands génomes (parfois  $\gg 1$  Mpb) comportant quelques gènes homologues à des gènes cellulaires. Au départ, des phylogénies moléculaires utilisant de méthodes de reconstruction simple, plaçaient ces gènes à la base des eucaryotes, ce qui a favorisé l'idée que les virus géants formaient un quatrième domaine du vivant proche des eucaryotes (La Scola *et al.*, 2003), (Raoult & Forster, 2008). Toutefois, des méthodes de reconstruction phylogénétique plus robustes et l'inclusion d'un échantillonnage taxonomique plus complet ont permis de montrer que ces gènes avaient été acquis par transfert horizontal à partir d'hôtes eucaryotes, réfutant l'idée d'un quatrième domaine. Les virus géants ont aussi acquis des gènes à partir de bactéries, et sont donc de véritables chimères (Moreira & Brochier-Armanet, 2008 ; Boyer *et al.*, 2009 ; Moreira & López-García, 2009 ; Williams *et al.*, 2011). Si l'idée d'un quatrième domaine a été vite écartée, quelques chercheurs ont proposé que ces virus pourraient être le résultat d'une évolution régressive à partir de cellules. Depuis les travaux d'André Lwoff, on sait que les parasites ont tendance à évoluer par réduction, en éliminant progressivement des fonctions dont ils n'ont plus besoin. Est-ce que les virus géants pourraient constituer un tel cas ? En réalité, il n'y a pas de support solide à ce sujet. D'une part, cellules et virus n'ont aucune continuité structurelle (les cellules se divisent à partir de cellules, et les virus sont formés *de novo* par la cellule hôte à chaque génération). On n'a pas non plus la trace de stades évolutifs intermédiaires (des virus géants avec plus de gènes ou des structures eucaryotes). Et finalement, on peut montrer que les gènes eucaryotes ont été acquis par transfert horizontal par les virus (Moreira & Brochier-Armanet, 2008 ; Boyer *et al.*, 2009 ; Williams *et al.*, 2011). Etant anciens, ces gènes transférés se comportent comme les autres gènes viraux ; ils ont des biais compositionnels similaires et évoluent vite, ce qui rend plus probable un placement artéfactuel dans des arbres phylogénétiques avec des méthodes non appropriées. Finalement, la réponse la plus probable vient de l'analyse de gènes typiquement viraux de ces virus géants, qui sont apparentés aux polintons et, *in fine*, à certains virus bactériens (Figure 6). Ainsi, le scénario favorisé est celui des virus géants dérivant de virus bactériens qui se sont complexifiés par accrétion de gènes divers (Koonin & Yutin, 2019 ; Koonin *et al.*, 2020).

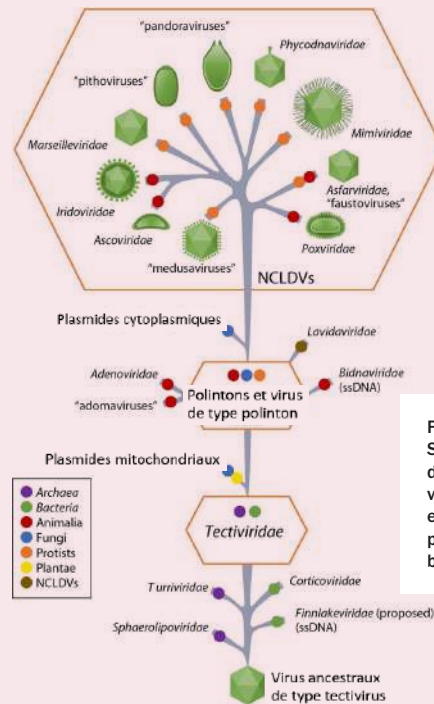


Figure 6. Scénario d'évolution des virus géants eucaryotes à partir de virus bactériens.

La question « les virus sont-ils vivants ou pas ? » dépend donc de la définition du vivant. Toutefois, cette question est marginale par rapport à celle primordiale de la définition du vivant dans le contexte d'origine de la vie et de la détection d'une vie extraterrestre potentielle. Dans ce cas, et quel que soit le modèle d'origine de la vie envi-

sagé, on peut faire plusieurs remarques : les parasites ne peuvent apparaître avant leurs hôtes, pas plus qu'un monde vivant ne peut être peuplé que de virus, en l'absence d'organismes qui opèrent des fonctions métaboliques directes. La détection de virus dans un tel cas impliquerait la présence d'organismes incontestablement vivants.

## Questions ouvertes

Au-delà d'établir, ou d'adopter, une définition consensuelle de la vie/du vivant qui, pour le seul exemple dont on dispose (la vie sur Terre), implique le couplage d'un système génétique et d'un système de transformation de la matière et de l'énergie, la grande question reste celle de l'origine de la vie. Dans le domaine de la biologie, plusieurs questions ouvertes à l'interface biologie-(géo)chimie et d'inférence de processus d'évolution et d'écologie précoces peuvent être formulées.

**Comment un système génétique et un système métabolique peuvent (co)évoluer et s'associer pour permettre le passage d'une chimie organique complexe à la biochimie ?**

Il faut faire converger les modèles d'origine de la vie vers un modèle plausible, dont les éléments, en particulier déterministes, soient validés expérimentalement, et compatible avec les conditions de la planète au début de l'Archéen. Les approches de la biologie synthétique et de la chimie de systèmes seront utiles.

**L'origine de la vie est la première grande transition évolutive (Maynard-Smith & Száthmary, 1995 ; Száthmáry, 2015 ; West et al., 2015). Comment passer d'une évolution chimique à une évolution biologique ?**

Des réflexions sur la notion d'évolution sont souhaitables. L'évolution biologique inclut l'évolution darwinienne, qui s'appuie sur la sélection naturelle de la variation héritable, et la dérive ou évolution neutre. Or, les deux processus ont des analogues pré-biotiques. Des phénomènes stochastiques interviennent, par exemple, dans l'évolution planétaire ou des systèmes solaires, y compris le nôtre (Hoffmann et al., 2017). La sélection naturelle opère, par exemple, dans le monde chimique, de tel sorte que, à partir d'une chimie organique diverse, certaines molécules et réseaux catalytiques ont dû être sélectionnés - on pourrait dire qu'ils avaient une meilleure « fitness » chimique. L'évolution biologique découle d'une évolution physico-chimique préexistante (Vasas et al., 2012 ; Vasas et al., 2015). Certains chercheurs évoquent la possibilité de construire un concept de méta-évolution (Charlat et al., 2021). Est-ce nécessaire ? Un dialogue avec les autres disciplines impliquées (physique, chimie) semble important.

**Hasard versus nécessité = chance versus déterminisme à l'origine de la vie (à un niveau plus réduit, cette opposition se retrouve entre dérive génétique et sélection naturelle, même si la stochasticité joue à bien d'autres niveaux, par exemple sur la mutation). Quel rôle relatif pour chaque composante ?**

Ce débat, toujours actif, est illustré par les positions opposées de Jacques Monod (origine improbable de la vie) et de Christian de Duve (origine très probable, étant données certaines conditions initiales). Est-ce que la vie sur Terre a eu une origine unique ou multiple ? Les formes de vie actuelles découlent d'un même ancêtre, mais d'autres formes de vie moins compétitives et ayant pu contribuer à la forme de vie qui a pris le dessus ont pu émerger en parallèle. Les réponses à ces questions conditionnent l'espoir de retrouver la vie ailleurs dans l'univers.

**Le nœud gordien dans l'émergence de la vie sur Terre semble l'origine du code génétique – le lien entre un message codé (gènes) et la fonction exprimée (protéines, *in fine* responsables du métabolisme), en d'autres termes entre génotype et phénotype, est critique. Comment ce lien s'est-il mis en place ?**

**L'origine des parasites moléculaires – virus et autres répliqueurs égoïstes, des « tricheurs » en tout genre semble inévitable, et profondément liée à la nature même du processus d'évolution biologique. Pourquoi ?**

Quelle(s) est/sont leur(s) origine(s) ? Sont-elles convergentes ? Les éléments parasites peuvent être apprivoisés, suivant un *continuum* mutualisme-parasitisme. Est-ce que ces processus ont joué un rôle lors de l'émergence et l'évolution précoce de la vie ?

**Quelles sont les limites physico-chimiques de la vie ?**

Bien que les limites de distribution de la vie terrestre soient plus ou moins établies pour des paramètres donnés, par exemple la température (limite supérieure environ 115-120 °C), nous ne connaissons pas encore avec exactitude la distribution de la vie et ses adaptations moléculaires face à des conditions poly-extrêmes. Connaître les limites physico-chimiques de la vie sur Terre permet de circonscrire le type



d'environnements extra-terrestres où l'on s'attend à trouver une vie basée sur une chimie organique comparable avec l'eau comme solvant. Une telle chimie organique constitue le fondement le plus réaliste pour une autre forme de vie potentielle dans notre univers. On peut aussi se demander si, jusqu'à un certain point, ces limites sont intrinsèquement liées causalement à l'apparition de la vie, et sont donc fixées, ou si elles ont pu évoluer dans le temps.

**Reconstruire l'histoire précoce de la vie. Peut-on affiner le portrait de LUCA ? Peut-on envisager des étapes d'évolution plus précoces, pré-LUCA ?**

La combinaison de phylogénomique et de modélisation moléculaire à partir des structures ancestrales inférées avec des approches expérimentales pourraient aider à envisager, voire à mimer, ces étapes. De même, la reconstruction des stades ancestraux des organismes des trois domaines du vivant peut permettre

de mieux comprendre les grandes diversifications du vivant, de l'origine de la vie aux autres grandes transitions évolutives (en individualité) : origine de la cellule eucaryote et origines (diverses) des multicellularités complexes (c'est-à-dire d'organismes possédant des tissus plus ou moins organisés). Quel sont les rôles des grandes forces évolutives (dérive, sélection, compétition, coopération, symbiose...) dans ces transitions majeures ? On peut aussi se demander comment la co-évolution entre le monde vivant et le non-vivant (bioturbation, bio-minéralisation...) a pu conduire au monde tel que nous le connaissons (voir Atelier « À la frontière entre écologie et évolution »). Historiquement, un exemple emblématique est l'oxygénation de l'atmosphère par l'activité photosynthétique oxygénique de cyanobactéries il y a ~2,4 Ga qui a permis l'évolution des organismes aérobies qui aujourd'hui dominent la surface planétaire et, indirectement, l'apparition des eucaryotes.

## Verrous à lever

**Décloisonner l'étude des micro- et macro-organismes**

L'origine de la vie est l'origine de la biodiversité et implique la mise en place des mécanismes de l'évolution biologique. Ceux-ci sont essentiellement basés sur les mêmes quatre grands processus à l'œuvre en évolution mais sont souvent déclinés différemment en fonction du type d'organismes, micro- ou macro-organismes. Il s'agit de la spéciation, la migration, l'extinction et la dérive chez les macro-organismes, dont les correspondants en écologie microbienne seraient la diversification, la dispersion, la sélection et la dérive. Il en va de même pour certains mécanismes sous-jacents tels la nature et l'intensité des échanges génétiques (transfert horizontal de gènes, recombinaison homologue ou non-homologue, sexe méiotique). En écologie et en évolution, ces processus sont étudiés depuis longtemps, et largement, chez les macro-organismes ou certains micro-organismes sexués

(levures, ciliés...). C'est beaucoup moins le cas chez le reste de micro-organismes eucaryotes et procaryotes dont l'étude est d'ailleurs basée sur quelques modèles très spécifiques. Or, ces derniers ne reflètent peut-être pas, ou pas complètement, l'ensemble des processus éco-évolutifs à l'échelle de l'histoire de la vie sur Terre et de la vie à l'aube de son histoire. Il est impératif de remettre la biodiversité à la bonne échelle temporelle et de reconnaître la vastitude du monde microbien (archées, bactéries, eucaryotes unicellulaires) pour produire une théorie unifiée de l'écologie et de l'évolution du vivant. Ici, le verrou se situe dans la tradition de n'utiliser que certains modèles biologiques et l'extension, sans vérification ou sans considération d'alternatives, à l'ensemble du vivant. D'un point de vue strictement scientifique, un travail conceptuel plus audacieux et approfondi pour intégrer écologie et évolution micro- et macro-biennes semble nécessaire (voir Atelier « À la frontière entre écologie et évolution »).

### **Renforcer et améliorer des approches de reconstruction phylogénomique et de modélisation...**

...en vue de la reconstruction des premières diversifications du vivant et œuvrer à améliorer l'échantillonnage taxonomique, notamment en favorisant l'étude de branches méconnues de l'arbre du vivant et des virus. Si CNRS Écologie & Environnement est fort sur ce type de thématiques, les scientifiques travaillant sur ces domaines sont relativement peu nombreux.

### **Favoriser une véritable interdisciplinarité au-delà de la simple multidisciplinarité**

Pour comprendre l'origine de la vie, la seule approche biologique est restrictive, comme nous l'avons montré. Un travail interdisciplinaire entre biologie, géosciences, chimie et

physique, dans un contexte de large utilisation d'outils mathématiques et informatiques, est requis ; l'apport de la philosophie serait aussi considérable.

### **Former et transmettre**

Un travail de pédagogie auprès des chercheurs pour mieux intégrer l'ensemble de la biodiversité (micro- et macrobienne) dans leur contexte écosystémique serait souhaitable, ainsi qu'une meilleure communication dans ce sens vers le grand public, très concerné par la perte de biodiversité, mais peu au fait de la diversité microbienne. Il faut aussi traiter la question de la définition et de l'origine de la vie dans un contexte pragmatique, loin de la métaphysique, et communiquer dans un cadre scientifique. Ceci devrait attirer des chercheurs et étudiants vers le domaine et sa diversité d'approches.

## **Quels outils et quelles actions ?**

Comme mentionné plus haut, une simple approche disciplinaire paraît nécessaire, mais pas suffisante, d'où les propositions ci-dessous largement interdisciplinaires.

### **Soutien direct aux études / recherche sur la vie et son origine**

Outils possibles, dans un travail à l'interface entre différents instituts du CNRS :

- Petits moyens incitatifs, de type PEPS\* CNRS Écologie & Environnement ou équivalent, pour tester des points de blocage (sur des thèmes un peu plus larges, peut-être, comme l'évolution de la vie à grande échelle temporelle et les grandes diversifications en domaines du vivant) ; on pourrait aussi penser à un réseau thématique (RT ancien GDR\*) sur ce sujet.
- Action et/ou contribution aux actions de type « Origins ». Plusieurs universités ont mis en place des programmes ou des instituts « Origins » qui se penchent sur la question de l'origine de la vie (Paris, Marseille, Bordeaux, Grenoble) et le CNRS pilote via CNRS Terre & Univers un PEPR\* « Origins ». Ces initiatives témoignent de l'intérêt porté à la question, mais ce sont des actions

initiées essentiellement par des astrophysiciens et chimistes intéressés par l'exobiologie. La Société Française d'Exobiologie (SFE) pourrait avoir un rôle fédérateur à jouer. L'implication de CNRS Écologie & Environnement et de CNRS Biologie serait fortement souhaitable. Un véritable appel à projets MITI\* sur le sujet, avec appel aux sciences humaines et sociales (philosophie, en particulier), serait un soutien conséquent.

- Postes de chercheurs et chercheuses interdisciplinaires et/ou colorés, et postes de soutien à la recherche.
- Thèses interdisciplinaires de type 80 Prime (chimie-bio, géochimie-bio) pour soutenir la double formation aux interfaces. Le soutien aux masters et autres formations interdisciplinaires et surtout, la mise en place d'offres de thèse en interface, par exemple sous des co-directions impliquant plusieurs instituts du CNRS, qui soient plus longues, avec un financement possible de quatre ans, seraient des outils utiles.

## Soutien direct aux plates-formes/équipement

Des plate-formes dédiées (ou du moins des moyens techniques), dans un cadre, à définir, seraient souhaitables, notamment en partenariat ou en collaboration avec CNRS Terre & Univers, CNRS Chimie et CNRS Nucléaire & Particules. Il faudrait aussi intégrer les moyens de calcul pour la modélisation (pour modéliser la vie, pour inférer des processus à partir des observations dans un contexte « origines ») et pour la reconstruction phylogénomique à grande échelle.

## Transfert et formation

Faciliter l'intégration conceptuelle d'une théorie de l'écologie et évolution de l'ensemble du vivant et les interactions inter-disciplinaires en vue d'analyser l'origine et les premières étapes évolutives du vivant. Cela peut se faire à travers un RT pour soutenir des ateliers, des écoles d'été et en imaginant la publication d'un livre, à terme, sur l'origine de la vie qui pourrait servir de source d'inspiration/vulgarisation.

## RÉFÉRENCES

- Ameta, S., Blokhuis, A., Jeancolas, C. & Nghe, P. (2022). Toward Evolution in Chemical Reaction Networks. In: Prebiotic Chemistry and Life's Origin. The Royal Society of Chemistry, pp. 379-423.
- Blokhuis, A., Lacoste, D. & Nghe, P. (2020). Universal motifs and the diversity of autocatalytic systems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117, 25230-25236.
- Boyer, M., Yutin, N., Pagnier, I., Barrassi, L., Fournous, G., Espinosa, L. et al. (2009). Giant Marsellevirus highlights the role of amoebae as a melting pot in emergence of chimeric microorganisms. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 106, 21848-21853.
- Charlat, S., Ariew, A., Bourrat, P., Ferreira Ruiz, M., Heams, T., Huneman, P. et al. (2021). Natural Selection beyond Life? A Workshop Report. In: *Life*.
- Danger, G., Plasson, R. & Pascal, R. (2012). Pathways for the formation and evolution of peptides in prebiotic environments. *Chem. Soc. Rev.*, 41, 5416-5429.
- Ehrenfreund, E., Spaans, M. & Holm, N.G. (2011). The evolution of organic matter in space. *Phil Trans R Soc A*, 369, 538-554.
- Fry, I. (2000). *The emergence of life on Earth: a historical and scientific overview*. Rutgers University Press, New Brunswick, NJ, USA.
- Gánti, T. (1971). *The principle of life*. 1st edition edn. Gondolat, Budapest.
- Gardner, M. (1970). *Mathematical Games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game «life»*. *Sci. Am.*, 223, 120-123.
- Gargaud, M., Martin, H., López-García, P., Montmerle, T. & Pascal, R. (2013). *Young Sun, Early Earth and the Origins of Life. Lessons for Astrobiology*. 2012 edn. Springer, Heidelberg.
- Higgs, P.G. & Lehman, N. (2015). The RNA World: molecular cooperation at the origins of life. *Nature reviews. Genetics*, 16, 7-17.
- Hoffmann, V., Grimm, S.L., Moore, B. & Stadel, J. (2017). Stochasticity and predictability in terrestrial planet formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, 2170-2188.
- Hug, L.A., Baker, B.J., Anantharaman, K., Brown, C.T., Probst, A.J., Castelle, C.J. et al. (2016). A new view of the tree of life. *Nat Microbiol*, 1, 16048.
- Joyce, G.F. & Szostak, J.W. (2018). Protocells and RNA Self-Replication. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.*, 10.
- Koonin, E.V., Dolja, V.V., Krupovic, M., Varsani, A., Wolf, Y.I., Yutin, N. et al. (2020). Global organization and proposed megataxonomy of the virus world. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 84.
- Koonin, E.V. & Starokadomsky, P. (2016). Are viruses alive? The replicator paradigm sheds decisive light on an old but misguided question. *Stud. Hist. Philos. Biol. Biomed. Sci.*, 59, 125-134.
- Koonin, E.V. & Yutin, N. (2019). Evolution of the Large Nucleocytoplasmic DNA Viruses of Eukaryotes and Convergent Origins of Viral Gigantism. *Adv. Virus Res.*, 103, 167-202.
- Krupovic, M., Dolja, V.V. & Koonin, E.V. (2019). Origin of viruses: primordial replicators recruiting capsids from hosts. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 449-458.
- Krupovic, M., Dolja, V.V. & Koonin, E.V. (2020). The LUCA and its complex virome. *Nat. Rev. Microbiol.*, 18, 661-670.
- Krupovic, M. & Koonin, E.V. (2017). Multiple origins of viral capsid proteins from cellular ancestors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 114, E2401-e2410.
- Kun, A., Szilagy, A., Konnyu, B., Boza, G., Zachar, I. & Szathmary, E. (2015). The dynamics of the RNA world: insights and challenges. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1341, 75-95.
- La Scola, B., Audic, S., Robert, C., Jungang, L., de Lamballerie, X., Drancourt, M. et al. (2003). A giant virus in amoebae. *Science*, 299, 2033.
- Malaterre, C., Jeancolas, C. & Nghe, P. (2022). *The Origin of Life: What Is the Question?* *Astrobiology*, 22, 851-862.
- Maynard-Smith, J. & Szathmary, E. (1995). *The major transitions in evolution*. Oxford University Press, New York.
- Moreira, D. & Brochier-Armanet, C. (2008). Giant viruses, giant chimeras: The multiple evolutionary histories of Mimivirus genes. *BMC Evol. Biol.*, 8, e12.
- Moreira, D. & López-García, P. (2009). Ten reasons to exclude viruses from the tree of life. *Nat. Rev. Microbiol.*, 7, 306-311.
- Muchowska, K.B. & Moran, J. (2020). Peptide synthesis at the origin of life. *Science*, 370, 767-768.
- Muchowska, K.B., Varna, S.J. & Moran, J. (2020). Nonenzymatic Metabolic Reactions and Life's Origins. *Chem. Rev.*, 120, 7708-7744.
- Nghe, P., Hordijk, W., Kauffman, S.A., Walker, S.L., Schmidt, F.J., Kemble, H. et al. (2015). Prebiotic network evolution: six key parameters. *Mol. Biosyst.*, 11, 3206-3217.
- Öberg, K.I. (2016). Photochemistry and Astrochemistry:

## RÉFÉRENCES

- Photochemical Pathways to Interstellar Complex Organic Molecules. *Chem. Rev.*, 116, 9631-9663.
- Pavlinova, P., Lambert, C.N., Malaterre, C. & Nghe, P. (2022). Abiogenesis through gradual evolution of autocatalysis into template-based replication. *FEBS Lett.*, n/a.
  - Podolsky, S. (1996). The role of the virus in origin-of-life theorizing. *J. Hist. Biol.*, 29, 79-126.
  - Powner, M.W., Gerland, B. & Sutherland, J.D. (2009). Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions. *Nature*, 459, 239-242.
  - Pressman, A., Blanco, C. & Chen, I.A. (2015). The RNA World as a Model System to Study the Origin of Life. *Curr. Biol.*, 25, R953-963.
  - Raoult, D. & Forterre, P. (2008). Redefining viruses: lessons from Mimivirus. *Nat. Rev. Microbiol.*, 6, 315-319.
  - Scharf, C., Virgo, N., Cleaves, H.J., Aono, M., Aubert-Kato, N., Aydinoglu, A. et al. (2015). A Strategy for Origins of Life Research. *Astrobiology*, 15, 1031-1042.
  - Scornavacca, C., Delsuc, F. & Galtier, N.e. (2020). Phylogenetics in the Genomic Era. No commercial publisher | Authors open access book.
  - Selosse, M.-A. (2022). Les virus sont-ils vivants ? Leçon d'interdépendance. *Med. Sci. (Paris)*, 38, 1061-1063.
  - Szathmáry, E. (2007). Coevolution of metabolic networks and membranes: the scenario of progressive sequestration. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 362, 1781-1787.
  - Szathmáry, E. (2015). Toward major evolutionary transitions theory 2.0. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 112, 10104-10111.
  - Szostak, J.W., Bartel, D.P. & Luisi, P.L. (2001). Synthesizing life. *Nature*, 409, 387-390.
  - Van der Gulik, P.T. & Speijer, D. (2015). How amino acids and peptides shaped the RNA world. *Life (Basel)*, 5, 230-246.
  - Van Regenmortel, M.H. (2016). The metaphor that viruses are living is alive and well, but it is no more than a metaphor. *Stud. Hist. Philos. Biol. Biomed. Sci.*, 59, 117-124.
  - Vasas, V., Fernando, C., Santos, M., Kauffman, S. & Szathmáry, E. (2012). Evolution before genes. *Biol. Direct*, 7, 1; discussion 1.
  - Vasas, V., Fernando, C., Szilágyi, A., Zachár, I., Santos, M. & Szathmáry, E. (2015). Primordial evolvability: Impasses and challenges. *J. Theor. Biol.*, 381, 29-38.
  - Von Neumann, J. (1949). Theory of self-reproducing automata. In: *Lectures on the Theory and Organisation of Complicated Automata* (ed. Burks, A.W.). University of Illinois Press Urbana, IL.
  - West, S.A., Fisher, R.M., Gardner, A. & Kiers, E.T. (2015). Major evolutionary transitions in individuality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 112, 10112-10119.
  - Williams, T.A., Embley, T.M. & Heinz, E. (2011). Informational gene phylogenies do not support a fourth domain of life for nucleocytoplasmic large DNA viruses. *PLoS One*, 6, e21080.
  - Xu, J., Chmela, V., Green, N.J., Russell, D.A., Janicki, M.J., Góra, R.W. et al. (2020). Selective prebiotic formation of RNA pyrimidine and DNA purine nucleosides. *Nature*, 582, 60-66.

# Sexe, genre

## espèce & évolution

*Auteurs : Raphaëlle Chaix (Eco-Anthropologie), Mathilde Dufay (CEFE), Gabriel Marais (CIBIO), Sébastien Villotte (Eco-Anthropologie)*

*Contributeurs : Thomas Lenormand (CEFE), Tim Janicke (CEFE), Jeanne Tonnabel (ISEM), Michel Raymond (ISEM), Aline Thomas (Eco-Anthropologie), Thierry Hoquet (IREPH)*

### LES 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Définir un vocabulaire commun autour du sexe et du genre
- ▶ Organiser des rencontres interdisciplinaires sur des sujets ciblés débattus dans la littérature et la société
- ▶ Créer un incubateur d'interdisciplinarités nouvelles autour des notions de genre et de sexe

## Introduction

L'objectif de cet atelier était de discuter des recherches actuelles et futures relatives aux notions de sexe et de genre, en privilégiant un éclairage évolutif. La thématique de cet atelier avait donc la particularité de se situer à l'interface entre plusieurs approches scientifiques. En effet, l'étude de l'évolution de la reproduction sexuée dans le vivant au sens large requiert les outils et concepts développés en évolution et en écologie, afin de comprendre les transitions évolutives des modalités de reproduction, les causes probables de ces transitions et les conséquences que ces différents modes de reproduction peuvent avoir sur l'écologie des espèces et des populations.

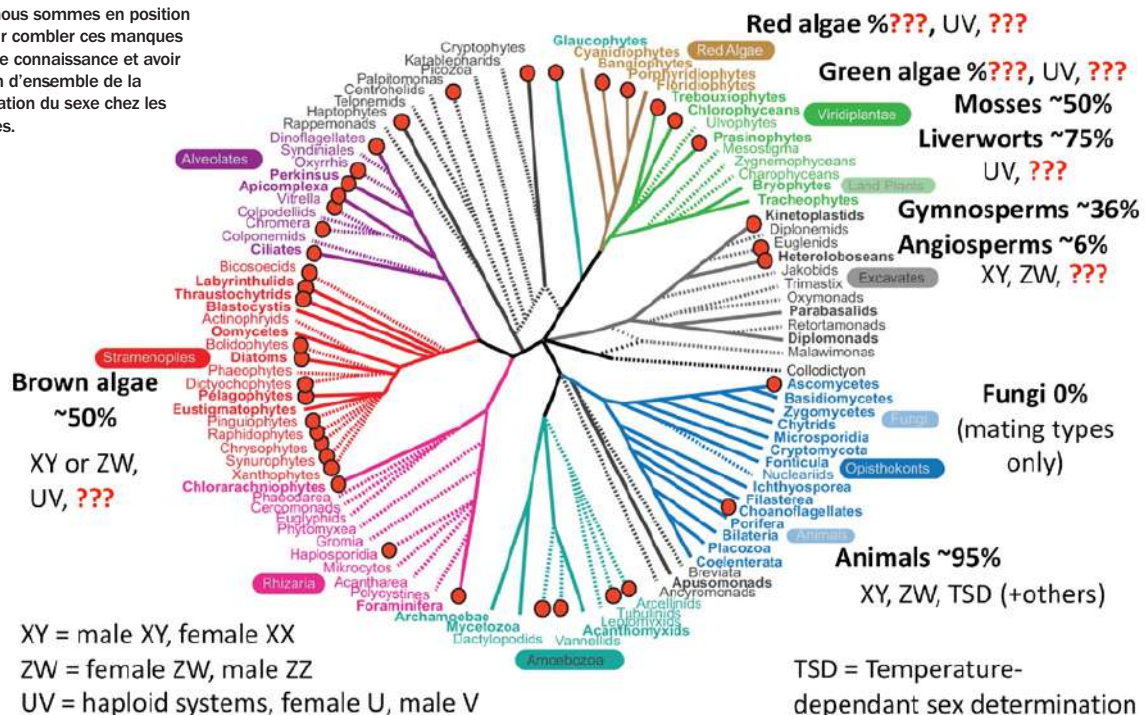
Ces travaux peuvent également s'appuyer sur des approches de génétique fonctionnelle, notamment pour la compréhension des facteurs génétiques impliqués dans la mise en place des caractères liés au sexe (Figure 1).

Lorsque la question porte sur notre espèce, les approches mêlent sciences de la vie et sciences humaines. Notre espèce, comme un certain nombre d'autres, présente un système de reproduction fondé

sur une séparation des sexes mâles et femelles entre individus. Se pose chez elle de nombreuses questions relatives aux rapports de genre. La définition du concept de genre n'a cessé d'évoluer au fil des dernières décennies. Pour la sociologie actuelle, le genre est un dispositif de différenciation binaire, portant à la fois sur des caractères biologiques et sociaux. Les genres au pluriel sont le résultat de ce dispositif (Bereni *et al.*, 2020, Chaix *et al.*, 2022). Le genre recouvre donc de nombreux processus sociaux différenciant les hommes et les femmes, par exemple la répartition des tâches, les inégalités de statut, l'organisation familiale, la mobilité, l'alimentation... Pour aborder ces questions, les recherches peuvent puiser dans des données aussi diverses que celles produites par la génomique, l'archéologie, l'anthropologie biologique et l'anthropologie sociale.

Le programme de l'atelier était donc ambitieux et embrassait un champ vaste et multidisciplinaire. Cette restitution tente d'en résumer les principaux points (état des lieux, recherches futures, verrous et moyens) suivant trois axes séparés, avant de proposer une brève conclusion.

Figure 1 : Arbre phylogénétique des eucaryotes indiquant les types de détermination du sexe et notamment les chromosomes sexuels. Les animaux sont le groupe le mieux étudiés. De nombreuses questions subsistent concernant les autres groupes. Pour certains groupes les % d'espèces à sexes séparés ou le % d'espèces avec des chromosomes sexuels, et la diversité des types de détermination du sexe ne sont pas connus. Avec les nouvelles approches développées ces dernières années et décrites dans le texte, nous sommes en position de pouvoir combler ces manques dans notre connaissance et avoir une vision d'ensemble de la détermination du sexe chez les eucaryotes.





## Aux origines du sexe et des sexes

Les modalités de reproduction dans le vivant sont extrêmement diversifiées et leur étude constitue un des axes majeurs et historiques de recherches en biologie évolutive, qui peuvent être appréhendés de façon séquentielle :

- 1) comment comprendre l'évolution et le maintien de la reproduction sexuée au sens strict ?
- 2) chez les espèces à reproduction sexuée, comment se combinent la production des gamètes

mâles et femelles, quels facteurs génétiques déterminent l'appartenance des individus à une catégorie sexuelle donnée (mâle, femelle, hermaphrodite) et comment ces facteurs ont-ils évolué ?

- 3) chez les espèces à sexes séparés, comment décrire et comprendre l'évolution de différences phénotypiques entre individus mâles et femelles ?

### Cinquante ans de « paradoxe du sexe », comment résoudre une des énigmes centrales de la biologie évolutive

#### État des lieux

En 1971, il y a tout juste cinquante ans, Maynard Smith formulait de manière percutante ce qui allait devenir « la reine des questions » de la biologie évolutive : pourquoi la reproduction sexuée (entendue ici comme un mode de reproduction impliquant un brassage génétique via la méiose et la recombinaison) se maintient-elle chez les eucaryotes ? Il expliqua alors de manière très lucide le fameux « coût de deux » associé aux mâles. En effet, dans une population sexuée ayant un sexe-ratio équilibré, un mutant parthénogénétique double en fréquence à chaque génération quand il est rare. Cet avantage sélectif semble démesuré par rapport aux bénéfices éventuels du sexe et de la recombinaison. Ce constat est à la base de ce « paradoxe du sexe ». En cinquante ans de recherches, de nombreux points se sont clarifiés, pourtant la question n'est pas totalement résolue (Otto & Lenormand, 2002). Il paraît opportun de faire un point, après ce demi-siècle de recherche, et de faire un peu de prospective sur les pistes qui permettraient peut-être de finalement résoudre cette question.

#### Recherches futures

Ces pistes sont au moins au nombre de deux. D'un côté il semble nécessaire de quantifier de manière plus réaliste et à l'échelle de génomes entiers le bénéfice de la recombinaison. Ce chantier a été largement entamé, notamment théoriquement, mais cette quantification n'est pas entièrement aboutie, pour

prendre en compte la diversité des mécanismes mutationnels (duplications, élément transposables...), des mécanismes de recombinaison (hotspots...) et de l'intensité de la dérive (taille efficace, structuration).

Une autre piste est de mieux comprendre les transitions sexe-asexe. Le paradoxe du sexe repose sur l'idée que ces transitions peuvent avoir lieu assez simplement via une mutation. La réalité est nettement plus complexe. Dans de très nombreux cas, cette transition s'opère via des modifications de la méiose, avec des étapes intermédiaires de faible valeur sélective du fait de pertes d'hétérozygotie qui y sont associées. L'étude des organismes asexués (plus spécifiquement leur génome et leurs modifications de méiose), en particulier lorsqu'ils sont issus de transitions récentes, offre donc la perspective de mieux comprendre ces transitions, leur mise en place concrète et leur chance de se produire. Ensemble, ces pistes de recherche offrent la perspective de résoudre cette énigme emblématique de la biologie.

#### Verrous et moyens

Les défis à relever pour le futur sont les suivants :

- arriver à faire des modèles mathématiques ambitieux « à l'échelle des génomes » ;
- passer d'une génomique descriptive à une génomique « outil pour tester » ;
- passer des études sur la « biodiversité d'inventaire » à des études de biodiversité de fonctionnement (des systèmes génétiques, par exemple l'initiative *Tree of Sex*, 2014).

## Vers une vision synthétique de l'évolution de la détermination du sexe dans le vivant

### État des lieux

La détermination du sexe est considérée comme un processus amenant au développement d'individus produisant un seul type de gamètes, mâles ou femelles, chez les eucaryotes multicellulaires, (Bachtrog *et al.*, 2014). Chez les animaux, le groupe chez lequel la détermination du sexe est la mieux documentée, il y a différents types (génétique, environnemental). Mais le plus souvent, le sexe est déterminé par des chromosomes sexuels (XY quand le sexe mâle est hétérogamétique, ZW quand c'est le sexe femelle). Jusque dans les années 2010, l'étude des chromosomes Y (et W) était très difficile car il n'existait pas d'approche facile à déployer en génomique adaptée au fait que ces chromosomes sont très riches en séquences répétées et difficiles à assembler. Depuis 2010, il y a un foisonnement de méthodes alternatives au WGS (*whole-genome shotgun*, la méthode standard en génomique) adaptées à l'étude des chromosomes sexuels avec les technologies NGS (*Next-Generation Sequencing*) avec des lectures courtes (Muyle *et al.*, 2017 ; Palmer *et al.*, 2019). Ces méthodes ont permis de lever un verrou technique ; l'étude des chromosomes sexuels s'est fortement accélérée ce qui a permis d'apporter des informations notamment chez les plantes et les algues, où très peu de choses étaient connues, mais également chez les animaux (où avant 2010, seulement une poignée de chromosomes Y/W avaient été séquencés). Par exemple, chez les plantes à fleur, des dizaines de chromosomes sexuels ont été séquencés entre 2011 et 2022 (Renner & Muller, 2021). Le premier gène maître de la détermination du sexe a été identifié en 2014. Depuis, une dizaine d'autres ont été observés. Chez les algues, les premières informations sur les chromosomes U/V (un 3<sup>e</sup> type de chromosomes sexuels dans des espèces où les sexes sont haploïdes) ont été publiées (Coelho *et al.*, 2019). Chez les champignons, il y a des types sexuels, et non pas des sexes, et des chromosomes de types sexuels sont en cours de caractérisation (Branco *et al.*, 2018). Il est à noter qu'il existe une communauté assez grande en France sur ce sujet.

### Recherches futures

Si la recherche continue à ce rythme, ou même s'accélère, nous serons prochainement en mesure d'avoir pour la première fois une vision globale de la détermination du sexe chez les eucaryotes multicellulaires. Cette vision globale permettra de comprendre l'évolution de la détermination du sexe dans un cadre phylogénétique.

Cela permettra également de mieux comprendre l'influence des chromosomes sexuels au-delà de la détermination du sexe, par exemple sur l'établissement du dimorphisme sexuel et la biologie et la santé des sexes en général. Ces données impacteront certainement la recherche très active actuellement sur l'influence des chromosomes sexuels sur les différences de longévité mâle/femelle (Marais *et al.*, 2018).

Après la phase initiale de la révolution génomique, il y a eu une grande synthèse qui a permis d'identifier certains facteurs clés expliquant l'évolution des génomes (Lynch, 2007). Les chromosomes sexuels sont restés en dehors de cette synthèse. Une nouvelle synthèse les incluant est donc nécessaire et est possible.

### Verrous et moyens

La vision globale mentionnée plus haut sera sans doute facilitée par un travail collectif des chercheurs et chercheuses du domaine, ne serait-ce que pour organiser ces données dans des bases dédiées (ex. le travail précurseur de *Tree of Sex*, 2014). Des solutions originales utilisant l'*open data* sont à rechercher. De telles initiatives pourraient être soutenues par des IRNs\* ou des RTs\*.

Pour l'obtention de ces données, une certaine coordination pourrait également être intéressante. Des projets couvrant des groupes taxonomiques entiers pourraient également accélérer les choses. Les plateformes nationales de génomique et bioinformatique pourraient avoir un rôle à jouer dans de telles initiatives.

Les défis mentionnés dans la section précédente, sont également valables pour cette section.



## Dimorphisme sexuel et sélection sexuelle

### État des lieux

Les travaux pionniers de Darwin sur la sélection sexuelle (Darwin, 1859, 1871), reformulés et élargis par la suite (Bateman, 1948, Trivers, 1972) constituent le point de départ d'une immense cohorte de travaux visant à comprendre les mécanismes explicatifs aux très nombreux cas de dimorphisme sexuel au sein des espèces à sexes séparés. La sélection sexuelle, définie comme la sélection pour l'accès aux partenaires de reproduction et/ou à leurs gamètes a très tôt été prédite comme devant être plus forte chez les mâles que chez les femelles. Cette théorie, émergeant directement de l'anisogamie (*i.e.* le fait que les ovules soient produits en nombre plus réduit que les gamètes mâles), a ainsi été cristallisée en ce qu'on nomme aujourd'hui le concept des « *Darwinian sex roles* ». Un moyen de vérifier cet attendu est de mesurer le gradient de Bateman (régression du succès reproducteur individuel sur le nombre de partenaires de reproduction) et de la comparer entre mâles et femelles. La pente de ce gradient constitue une mesure de l'intensité de la sélection sexuelle. Des analyses comparatives récentes ont confirmé l'existence d'une sélection sexuelle plus forte chez les mâles (Janicke *et al.*, 2016).

### Recherches futures

L'universalité de ces résultats est néanmoins sujette à questionnement pour deux raisons majeures, ce qui permet de définir deux perspectives de recherches dans le domaine. D'une part, un nombre grandissant d'études démontre que les femelles peuvent aussi être en compétition pour les mâles, de façon peut être moins anecdotique qu'on ne le pensait auparavant (Hare *et al.*, 2019, Fritzsche *et al.*, 2021, Fromonteil *et al.*, 2023). D'autre part, l'immense majorité des études, théoriques comme empiriques, se concentre sur les animaux, groupe, certes historique pour la formalisation de la sélection sexuelle, mais qui n'est pas le seul dans lequel des fonctions reproductives mâles et femelles, associées à l'anisogamie, sont observables. Sur ce second point, l'inclusion des plantes, bien que

la littérature en évolution reconnaisse largement l'application des concepts et des prédictions de sélection sexuelle à ce groupe (Willson, 1990 ; Tonnabel *et al.*, 2021), est encore relativement mineure. L'application des méthodologies classiques ayant contribué aux tests de la théorie de la sélection sexuelle (génétique quantitative, évolution expérimentale...) chez les animaux a été faite ou est en cours chez quelques rares modèles végétaux (Tonnabel *et al.*, 2019 ; Kwok & Dorken, 2022 ; Johnson & Shaw, 2016). Ces études, encore rares, mettent en lumière des résultats souvent relativement comparables à ceux obtenus chez les animaux, tout en ouvrant un grand nombre de questions sur l'effet des spécificités végétales (recours aux insectes pour la réalisation des événements de reproduction, absence de capacités cognitives, immobilité des individus) sur le fonctionnement de la sélection sexuelle et ses conséquences évolutives. L'inclusion systématique d'espèces n'appartenant pas aux groupes historiquement étudiés pour la sélection sexuelle permettrait d'obtenir une vision plus globale des différences d'intensité de sélection sexuelle entre mâles et femelles, dans des espèces où l'anisogamie existe mais sans qu'elle soit forcément accompagnée par des événements d'accouplement et/ou des comportements (parades, combats, choix) qui peuvent les contrôler. Le groupe des Angiospermes, où la séparation complète des sexes constitue un système de reproduction relativement rare, dérivé et en général moins fixé que chez les animaux, est un groupe de choix pour l'étude de la sélection sexuelle dans un contexte évolutif très contrasté à celui des animaux.

### Verrous et moyens

Concernant l'étude de la sélection sexuelle chez les femelles, un premier verrou concerne un possible biais de publications focalisées sur les individus mâles (Fromonteil *et al.*, 2023). Dans ce contexte, l'encouragement du développement (1) d'études empiriques focalisées sur les traits femelles et sur l'amplitude et la modalité de la compétition entre elles et (2) d'études théoriques explorant les interrelations entre les processus de sélection sexuelle chez les femelles et chez

les mâles permettrait une compréhension plus équilibrée de ces processus.

Quant à la question de l'ubiquité des processus de sélection sexuelle dans le vivant, on constate une forte hétérogénéité du vocabulaire, de métriques et d'approches entre les études portant sur les plantes et celles portant sur les ani-

maux, qui freinent probablement l'émergence d'une vision globale. Les pistes à envisager ici seraient d'encourager d'une part les études de la sélection sur les modèles non « classiques » et d'autre part la collaboration et le dialogue entre les équipes de recherches travaillant sur des modèles biologiques contrastés.

## Aux origines du genre et des genres

### État des lieux

Pour la sociologie actuelle, le genre est un dispositif social de différenciation binaire des identités sexuées (Bereni *et al.*, 2020, Chaix *et al.*, 2022). Ses modalités d'expression sont extrêmement variables au sein des populations humaines actuelles, mais elles présentent aussi certaines constantes. Par exemple, la domination masculine est quasiment universelle, ce qui crée des normes de genre défavorisant généralement les femmes : elles ont moins d'accès aux ressources, moins d'autonomie, moins de soutien social et reçoivent moins d'investissement parental (Jayachandran, 2015, Weber *et al.*, 2019). Mais l'intensité de ces effets varient d'une population à l'autre. L'évolution des rapports de genre à travers l'espace et le temps fait l'objet d'un nombre grandissant d'études.

Peu comparable à une analyse fondée sur l'observation directe des comportements humains ou sur leur traduction écrite, l'étude des sociétés passées sans écriture ne peut être qu'indirecte et suppose une méthodologie adaptée. Les différentes modalités d'expression du genre et les attributs biologiques et sociaux sur lesquels il s'appuie laissent des traces potentiellement accessibles aux chercheurs. La confrontation des données anthropobiologiques, archéologiques et génétiques permet notamment de documenter certains faits sociaux spécifiques relatifs au genre (division des tâches, inégalités, systèmes de parenté, statuts, mobilité...) dans les populations du passé et d'en discuter les dynamiques (Figure 2). Ainsi, les recherches françaises en archéologie funéraire, qui ont accordé depuis une trentaine d'années un intérêt particulier à la fiabilité d'une diagnose sexuelle des squelettes, ont posé les jalons d'un

discours objectif (statistique) sur les traitements funéraires différenciés entre les hommes et les femmes (ex. identification a posteriori du caractère genré de telle position d'inhumation, tel objet d'accompagnement...). Aujourd'hui, grâce à la combinaison d'analyses morphologiques, pathologiques, isotopiques et génétiques, l'ostéobiographie des squelettes atteint une haute résolution. Outre l'identité biologique élémentaire (âge, sexe), les restes humains donnent ainsi l'accès à divers aspects de la vie des sujets : activité, diète, santé, mobilité... En contexte funéraire, la démarche croisée bioarchéologique la plus intégrée possible permet d'évaluer ce qu'une structuration plus ou moins genrée du monde des morts traduit de l'organisation sociale des vivants (Thomas, 2022).

La division du travail est l'un des aspects des rapports de genre qui peut être tracé dans le passé. C'est notamment possible grâce à l'étude des indicateurs squelettiques d'activités, c'est-à-dire des modifications des os et des dents associables aux tâches pratiquées durant la vie des individus (Lozano *et al.*, 2021, Sparacello *et al.*, 2017, Villotte & Knüsel, 2014). Des études récentes ont illustré des différences marquées entre hommes et femmes en termes de localisation des contraintes biomécaniques exercées au niveau des membres supérieurs, indiquant l'existence très probables de « strictes » divisions de certaines activités en fonction du sexe dans la majorité des échantillons préhistoriques analysés (Sparacello *et al.*, 2017, Villotte & Knüsel, 2014). Ces résultats tendent à montrer que la division genrée des tâches, universelle actuellement, a une histoire ancienne :



© Maf Sak

### Analyse du squelette

(morphologie, marqueurs d'activité, isotopes, ADN...)

- âge et sexe
- alimentation
- santé
- mobilité
- activité

**Analyse du funéraire** (tombe, position, objets...)

- statut social



Division des tâches ?

Inégalités de statut ?

Inégalités alimentaires ?

Organisation sociale ?

elle était par exemple très probablement présente en Europe au Paléolithique supérieur, et peut-être également au Paléolithique moyen.

Les généticiens développent plus spécifiquement des outils permettant de reconstruire l'histoire des organisations sociales humaines à partir de l'ADN moderne (Zeng *et al.*, 2018), et de l'ADN ancien extrait de vestiges osseux (Racimo *et al.*, 2020). L'organisation sociale, structurée autour de la règle de filiation, de résidence et d'alliance, détermine la place et le rôle des femmes au sein de la famille et constitue un des facteurs prédictifs de l'intensité des normes de genre : les femmes sont particulièrement défavorisées dans les systèmes patrilineaires (les enfants sont rattachés au clan de leur père) et patrilocaux (les femmes vont vivre chez leur mari au moment du mariage) (Sanderson *et al.*, 2015).

Des données issues de la primatologie et de l'éthologie apportent également de nouvelles informations sur l'origine évolutive des traits

Figure 2. La confrontation des données anthropobiologiques, génétiques et archéologiques (en particulier funéraires) permet de documenter certains faits sociaux relatifs au genre dans les populations du passé (statuts et rôles sociaux, systèmes de parenté, mobilité résidentielle...) et d'en discuter les dynamiques. L'analyse intégrative des restes humains (morphologiques, pathologiques, isotopiques, génétiques) permet d'accéder à l'identité et au parcours de vie des individus (âge au décès, sexe, alimentation, état de santé, activité...), tandis que l'analyse de leur traitement funéraire (type de tombe, position, objets d'accompagnement...) permet de collecter des informations relatives à leur statut social. La comparaison de ces données pour les individus dont le sexe est identifié permet d'inférer les règles sociales corrélées au sexe et d'éventuelles inégalités de genre : division des tâches, comportements alimentaires contrastés, inégalités des statuts, organisation patri- ou matrilineaire, patri- ou matrilocale.

sociaux liés au sexe, comme la vie en couple, la dominance d'un sexe sur l'autre, l'investissement paternel, la matrilocalité, la patrilocalité... (Davidian *et al.*, 2022).

### Recherches futures

Notre connaissance des rapports de genre dans les populations humaines du passé est encore très parcellaire. Retracer leur évolution à travers l'espace et le temps reste un enjeu majeur. Il s'agit d'une étape préalable qui permettra ensuite de tester différentes hypothèses relatives aux déterminants écologiques, socio-économiques et culturels influençant ces rapports de genre.

L'analyse des squelettes permet d'aborder la question des inégalités de genre à différents

stades de la vie des individus par le prisme de la santé, entendue ici au sens large, c'est-à-dire incluant les maladies, les trajectoires de croissance, les comportements alimentaires... Elle renseigne également sur la division des tâches. Sur ce dernier point, il conviendra d'évaluer si la division genrée des tâches se retrouve pour la majorité (ou la totalité) des groupes préhistoriques et historiques, de documenter les variations d'expression de cette division du travail,

d'identifier les possibles constantes, et d'évaluer la relation entre la santé des sujets féminins et leurs activités quotidiennes dans les groupes humains du passé.

L'étude des données funéraires est également un moyen privilégié d'identifier dans les populations du passé des « statuts sociaux » en fonction des sexes, et de potentielles hiérarchisations hommes/femmes. Ces données funéraires sont ainsi complémentaires de celles obtenues à partir de l'analyse des squelettes car elles renseignent sur la « valeur sociale » différentielle de telle activité, de tel groupe d'individus, de tel sexe. Il est ainsi possible de mettre en évidence certaines différences en termes d'inégalité sociale : qui/quoi est valorisé ou invisibilisé, selon quelle variabilité et quelle constante ? Par exemple, en Europe néolithique, le masculin est valorisé dès lors qu'une forte hiérarchisation sociale est exprimée dans le monde des morts. Les raisons de ces valorisations différentielles peuvent ensuite être interrogées : ce rôle est-il nécessaire à la « survie » du groupe ou est-il au contraire totalement indépendant d'une quelconque nécessité vitale ? Ce rôle est-il acquis au cours de la vie de l'individu ou résulte-t-il d'un héritage familial ?...

De nombreuses publications utilisant l'ADN moderne et ancien pour reconstruire les organisations sociales humaines passées sont parues ces dernières années dans des revues prestigieuses. Il s'agit d'études centrées sur des approches purement génétiques ou combinant également d'autres types de données (approches dites multi-proxy) (Rivollat *et al.*, 2022). La France, qui a été un des pays leader des recherches en anthropologie de la parenté au XX<sup>e</sup> siècle, doit saisir l'opportunité de maintenir son leadership sur ces questions, en utilisant ce nouvel outil qu'est l'ADN. Plusieurs équipes notamment à Paris, Bordeaux et Toulouse publient dans ce domaine. Les généticiens doivent favoriser les collaborations avec des anthropologues sociaux sur ces questions de manière à produire de la recherche interdisciplinaire de qualité, notamment dans l'interprétation des résultats. En outre, l'étude de l'ADN donne maintenant accès à l'épigénome, qui est un médiateur potentiel entre environnement

culturel (notamment normes de genre) et santé. Deux projets ANR fondés sur des données épigénétiques modernes et anciennes démarrent en France.

Vu le développement rapide des recherches montrant une composante culturelle dans le déterminisme de nombreux comportements chez les non humains, il apparaît en outre nécessaire de développer des recherches intégrant la construction culturelle des comportements mâles et femelles dans les modèles animaux non humains.

Les liens de cause à effet entre différents traits sociaux liés au genre (division des tâches, inégalités de statuts sociaux, monogamie, soins parentaux...) restent largement méconnus et hypothétiques, surtout lorsqu'on cherche à les situer les uns par rapport aux autres dans le temps de l'évolution humaine. Par exemple, la division sexuelle des activités implique-t-elle *de facto* des inégalités entre genres ? Quelle conséquence a-t-elle sur les organisations familiales et sur la mobilité des deux sexes ? Comment les organisations sociales rétroagissent-elles sur les inégalités entre les sexes ? Quel est le lien entre division des tâches, monogamie et investissement paternel ? Ces questions sont très complexes d'autant qu'elles mobilisent des disciplines multiples, notamment l'anthropologie sociale et biologique, la paléanthropologie, l'archéologie, l'évolution, la génétique des populations, l'éthologie... De nouvelles formes d'interdisciplinarité vont être nécessaires pour construire et tester des modèles d'évolution des différentes composantes du genre dans les sociétés humaines et non humaines, prenant en compte les dimensions à la fois biologiques, évolutives et culturelles. Notons aussi que le recours à des données ethnologiques actuelles, pour ensuite projeter les résultats sur les populations du passé, est une démarche courante (visant à pallier le manque de données sur le passé) mais elle pose des questions épistémologiques spécifiques et leur champ d'application doit être discuté.

## Verrous et moyens

La portée des interprétations fondées sur l'analyse du squelette humain reste limitée par des écueils méthodologiques importants. Les recherches fondamentales sur la détermination du sexe et l'estimation de l'âge au décès (notamment des sujets adultes) à partir du squelette, de même que sur les indicateurs squelettiques d'activité et de santé, doivent être poursuivies. Le cadre interprétatif mérite également d'être clarifié afin que l'ensemble de la communauté ait conscience du degré de précision qu'il est possible d'attendre concernant les modes de vie et l'état de santé des populations du passé.

Plus généralement, l'interdisciplinarité requise par ces questions de recherche représente un défi majeur. Par exemple, des collaborations fructueuses se sont créées ces dernières années entre archéologues et généticiens, notamment pour identifier les organisations sociales passées à partir de l'ADN. Cependant, les anthropologues culturels, qui détiennent un savoir théorique et empirique sur les systèmes de parenté, à l'exception de quelques projets (Ly *et al.*, 2018), n'ont souvent pas pris part à ces recherches. Les généticiens et archéologues n'étant généralement pas formés à l'anthropologie de la parenté, il apparaît nécessaire de recréer des ponts entre ces disciplines et/ou de leur proposer des formations dédiées afin de leur donner les bases nécessaires à l'interprétation rigoureuse de leurs résultats dans ce domaine. De la même façon, alors que les anglo-saxons ont développé une archéologie du genre (*Gender Archeology*) reposant sur un socle théorique défini (qui peut être discuté), cette discipline n'a pas « pris » en France, privant les chercheuses et les chercheurs français d'une réflexion collective sur ces questions. Une telle réflexion permettrait de rassembler épistémologues, sociologues, archéologues et spécialistes d'autres disciplines afin de traiter différents enjeux de cette thématique et de développer une base de réflexion commune. Plus généralement, les recherches relatives aux origines du genre nécessitent le développement d'approches interdisciplinaires nouvelles entre biologie et sciences humaines. L'anthropologie

culturelle et biologique, la paléoanthropologie, l'archéologie, l'évolution, la génétique des populations, l'éthologie sont toutes concernées par ces questions, mais les chercheurs de ces disciplines se parlent trop rarement. La mise en place d'un réseau thématique de dialogue interdisciplinaire pourrait favoriser ces échanges et, surtout, servir d'incubateur d'interdisciplinarités nouvelles.

Un autre enjeu majeur réside dans les relations entre sciences et société autour de cette question des origines du genre. L'intérêt du grand public pour ces questions s'est accru considérablement dans les dernières années, d'autant que celles-ci sont liées à des enjeux sociétaux extrêmement importants relatifs à l'égalité des sexes et aux identités de genre. Au XX<sup>e</sup> siècle, certaines générations de chercheurs ont ignoré le rôle des femmes dans la préhistoire et développé des discours très androcentrés (*Man the Hunter*), quand d'autres ont cherché à remettre les femmes au cœur du discours (hypothèses du matriarcat originel, de *Woman the Gatherer* ou plus récemment de *Lady Sapiens*), par des prises de position souvent plus idéologiques que scientifiques. L'attente de la société (et des journaux scientifiques) étant si grande, il apparaît nécessaire de réfléchir à des dispositifs garantissant l'intégrité des travaux de recherche dans ce domaine. Privilégier des approches quantitatives plus que qualitatives est certainement une des manières d'éviter que des biais idéologiques contaminent l'interprétation des données. Plus généralement, une réflexion sur la communication des travaux scientifiques vers le grand public apparaît nécessaire.

À l'heure actuelle, diverses productions (des chercheurs eux-mêmes ou des journalistes) surfent sur le « buzz », faisant des effets d'annonce en procédant à une relecture plus ou moins radicale des données pour satisfaire un récit davantage idéologique que scientifique. Côté grand public, une partie de l'audience, fatiguée par ces effets d'annonce, devient réfractaire à la notion même du genre, quand d'autres rejettent l'idée même de la démarche scientifique visant à traiter des rapports homme/femme dans le passé.

## Du sexe au genre et du genre au sexe

### Etat des lieux

Les hommes et les femmes présentent un certain nombre de différences phénotypiques (dimorphisme de taille, différences de santé...) et comportementales. Comment expliquer ces différences ? Certains scientifiques cherchent dans les mécanismes biologiques proximaux (comme les chromosomes sexuels) ou évolutifs (comme l'anisogamie), l'origine de ces différences, quand d'autres rejettent toute implication du biologique sur ces traits, ramenant ces variations à des facteurs socio-culturels. Les différences de comportement entre individus sont plus généralement au cœur de ces débats. En particulier, le cas d'une possible origine biologique des orientations sexuelles a été source de discussion, entre deux points de vue opposés, lors de cet atelier.

En effet, certains déplorent les croyances et opinions de personnes, particulièrement en sciences humaines, qui refuseraient systématiquement de considérer la possibilité d'une influence biologique sur l'orientation sexuelle et plus généralement sur les comportements. D'après ces chercheurs, plusieurs recherches, dans le domaine des sciences biologiques, soutiendraient l'hypothèse d'un déterminisme biologique sur ces traits (ex. les travaux de M. Raymond sur l'homosexualité, ou encore Luoto *et al.*, 2019). Par ailleurs, certaines personnes appartenant à la communauté LGBTQIA+ ont pu se mettre elles-mêmes en quête de déterminants biologiques de l'homosexualité, notamment parce que cela permettrait de naturaliser ce comportement jugé « contre-nature » (Des recherches de Simon LeVay...).

D'autres chercheurs, souvent en sciences humaines, refusent quant à eux de « naturaliser » les comportements, s'opposant par exemple à l'idée que le sexe biologique serait la variable adéquate pour prédire le comportement des individus. Ils remettent en cause la notion de rôles mâles et femelles darwiniens. Ils citent à l'appui des biais dans les données (les mâles seraient plus étudiés que les femelles), ou questionnent la validité du gradient de Bate-

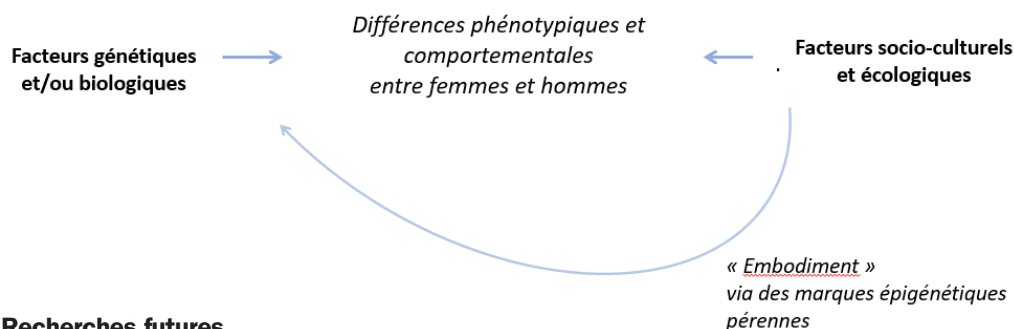
man comme métrique de sélection sexuelle. Ils proposent des modèles *sex-neutral* ou bien des modèles insistants sur la dimension stochastique des comportements (Gowaty & Hubbell, 2009). Ces chercheurs interrogent également la définition et la pertinence des traits étudiés par les biologistes. Par exemple, qu'entend-on vraiment par préférence homosexuelle ? Pour les sciences humaines et sociales, qui adoptent une méthodologie historique de caractère nominaliste, l'« homosexualité » est analysée comme une catégorie artificielle, construite dans le cadre psycho-médical à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Ce concept est venu remplacer d'autres concepts, utilisés auparavant pour qualifier cette orientation sexuelle, tout à fait différents dans leurs significations et connotations (ex. « sodomite », « inverti », « uraniste »...).

L'« homosexualité » n'est pas, pour certains chercheurs en sciences humaines et sociales (SHS), une « réalité naturelle », mais une concrétion historiquement variable, qui a un acte de naissance et qui est vouée à évoluer.

En outre, du point de vue sociologique, si filles et garçons, femmes et hommes, agissent différemment, c'est non la conséquence inéluctable d'un fondement biologique, mais l'effet du genre : un vaste dispositif de contraintes imposant en particulier la partition de l'espèce en deux groupes distincts. Ce caractère binaire fut mis en question par les phénomènes d'intersexuation dans l'espèce humaine (enfants naissant avec des génitoires non typiquement masculines ou féminines). Le genre apparaît alors comme un dispositif qui impose, chirurgicalement et socialement, à des anatomies diverses, de choisir entre deux (et seulement deux) catégories possibles. Les études de genre (histoire, sociologie, psychologie...) soulignent donc une forme de contingence ou d'artificialité, mais aussi d'un puissant système de contraintes qui oriente la formation et le devenir, notamment pour la production des corps (os, cerveaux, hormones, génitoires...) (Hoquet, 2016, 2022).





## Recherches futures

L'objectif ici est de sortir de ces visions réductionnistes (le tout biologique *versus* le tout culturel) et de recréer du dialogue entre disciplines pour prendre en compte à la fois les facteurs génétiques, environnementaux et sociaux-culturels (ainsi que leurs interactions) dans la genèse des différences phénotypiques et comportementales entre mâles et femelles, hommes et femmes (Figure 3). Ces interactions peuvent être étudiées sur le temps long de l'évolution (ex. sélection sexuelle et sélection sexuellement antagoniste), mais aussi à l'échelle de la vie de l'individu. De nouvelles recherches mettent ainsi en lumière l'influence des facteurs environnementaux et socio-culturels sur l'expression de gènes modulant les différences phénotypiques et comportementales mâles-femelles, notamment via des mécanismes épigénétiques (instinct maternel par exemple). L'étude de l'épigénome devrait permettre de mieux évaluer dans quelle mesure certains facteurs écologiques et socio-culturels deviennent « *embodied* » (« incorporés »).

L'étude de ces interactions devrait également permettre une meilleure compréhension de la plasticité du sexe et du dimorphisme sexuel en fonction du contexte environnemental et/ou socio-culturel, et ainsi de s'extraire des oppositions simplistes entre biologie et culture.

## Verrous et moyens

Développer ces approches plus « intégratives » demande de recréer des ponts entre sciences humaines et sociales et biologie, notamment pour s'entendre sur un vocabulaire commun, collecter des données permettant de caractériser l'environnement socio-culturel des individus et des populations, interpréter les données. Mais les

Ces études pourront également nous informer sur les facteurs expliquant l'évolution actuelle de la santé reproductive dans les populations humaines (fréquence des individus intersexes, baisse du nombre de spermatozoïdes chez les hommes...), ainsi que sur les différences de vieillissement et longévité entre hommes et femmes. Les recherches récentes ont ainsi mis en évidence que les différences de vieillissement entre femmes et hommes relèvent à la fois de facteurs évolutifs (la sélection sexuelle plus forte chez les mâles) (Lemaître et al., 2020), mais aussi de facteurs socio-culturels comme les normes de genre, qui du fait de la domination masculine, seraient délétères pour la santé des femmes (Reynolds et al., 2021).

**Figure 3.** Les différences phénotypiques et comportementales entre femmes et hommes dépendent à la fois de facteurs génétiques et/ou biologiques et de facteurs socio-culturels et écologiques. L'épigénome joue un rôle potentiel de médiateur entre les facteurs écologiques et socio-culturels et le phénotype (par exemple la santé humaine). L'étude de l'épigénome devrait permettre de mieux comprendre dans quelle mesure certains facteurs écologiques et socio-culturels deviennent « *embodied* » (« incorporés »). Ces approches questionnent la frontière entre inné et acquis, entre biologie et culture.

affecté l'état des relations sciences humaines et sociales et biologie : créant, d'un côté, une méfiance à l'égard de toute approche biologique des phénomènes humains et de l'autre, un sentiment de lassitude face aux résistances opposées et à une incompréhension persistante (notamment sur la signification des recherches portant sur le rôle des « gènes » et la question du « déterminisme »).

Aujourd'hui, ces oppositions peinent à être dépassées, malgré le fait que les paradigmes en sciences de l'évolution se soient largement renouvelés (mis à part quelques courants de pensée comme la psychologie évolutive qui s'inscrit dans une vision déterministe et adaptative du comportement humain). Aujourd'hui, les anthropologues généticiens cherchent moins dans l'ADN la raison d'être des comportements et des structures sociales, qu'ils ne découvrent dans les pratiques culturelles, un moteur d'évolution qui façonne la diversité génétique des populations. C'est le cas, par exemple, des pratiques alimentaires, ou des systèmes de parenté (Laland, Odling-Smee & Myles, 2010 ; Ly *et al.*, 2019). L'ADN est également désormais analysé comme « témoin » de pratiques culturelles, par exemple pour reconstruire des systèmes de parenté passés (voir partie 2).

Plus généralement, de nombreux laboratoires de biologie sont engagés aujourd'hui dans des recherches et des méthodologies qui s'opposent à tout réductionnisme génétique. On peut citer

l'exemple de « l'exposome » ou encore des recherches nouvelles sur l'épigénome.

Un réseau thématique de dialogue interdisciplinaire pourrait permettre de recréer du lien entre disciplines. Il s'agirait de s'entendre sur un vocabulaire commun : par exemple, définir les concepts de sexe et de genre (le genre est-il un concept utile en biologie ?) mais aussi qu'est-ce qu'un facteur ? un déterminisme ? une héritabilité ? Qu'entend-on par inné ? acquis ? Qu'est-ce que l'environnement ? Il y a de l'incompréhension entre les généticiens d'une part, qui ont l'impression de déjà prendre en compte la dimension environnementale dans leurs approches (notamment via la part de variance environnementale en génétique quantitative), et les sciences humaines et sociales d'autre part, qui se réfèrent au « milieu », à la « culture », à la « société », ce qui ne peut à leur sens être résumé sous l'étiquette « environnement ».

Ce réseau thématique pourrait également servir à fédérer une communauté autour de ce champs de recherche qui, à l'heure actuelle, apparaît dispersé entre différentes disciplines avec des méthodologies variées, si bien qu'il est parfois difficile de faire un bilan des connaissances.

Enfin, ce réseau thématique aurait vocation, comme pour la partie « Aux origines du genre et des genres », à être un incubateur de nouveaux projets interdisciplinaires entre biologistes et sciences humaines et sociales.

## Conclusion

De nombreuses pistes émergent de cet atelier et elles sont globalement de deux natures. D'une part, une série de perspectives spécifiques à chaque sous-thématique a permis d'identifier des sujets de recherche, tant empiriques que théoriques, à encourager pour le futur. Nous ne reprenons pas ici l'ensemble de ces pistes, car elles sont explicitées pour chacun des axes présentés dans ce document et constituent en cela un cadrage très stimulant des futures thématiques de recherche qu'il faudrait développer. D'autre part, sur de nombreux sujets, un besoin

de dialogue entre disciplines et sous disciplines a été clairement identifié. Ces réflexions motivent la formation d'un réseau thématique de dialogue interdisciplinaire sur la question sexe et genre. Ce réseau thématique aurait vocation à réunir chercheurs des sciences de la vie et des sciences humaines dont les sujets de recherche se rattachent à ce thème afin de :

- Discuter des définitions et s'entendre sur un vocabulaire commun : la polysémie et l'utilisation hétérogène entre communautés scien-



tifiques de termes tels que sexe, genre, inné vs. acquis, effet de l'environnement, déterminisme biologique, ont été relevées lors de cet atelier et freinent parfois la mise en place de discussions constructives.

- Organiser des journées d'étude sur des sujets ciblés, auquel les chercheurs de ces différentes disciplines seraient conviés pour une réflexion qui dépasse les frontières disciplinaires. Quelques exemples de journées d'étude qui apparaissent nécessaires :

- Qu'est-ce que la sélection sexuelle et comment la mesurer, de façon homogène dans les différents groupes du vivant ?
- Comment garantir l'intégrité scientifique autour de la question du genre, étant donné les fortes attentes sociétales ?
- Comment communiquer sur la question des origines du genre ?
- Quels facteurs à l'origine des différences phénotypiques et comportementales entre femmes et hommes ?
- Quel rôle de la construction sociale dans les différences comportementales mâles/femelles dans les espèces non humaines ?

- Créer des ponts entre disciplines et être l'incubateur d'interdisciplinarités nouvelles. Certains ponts interdisciplinaires sont apparus particulièrement nécessaires au cours de l'atelier :

- Intégrer davantage les anthropologues sociaux à l'effort actuel des généticiens et des archéologues de reconstruire conjointement l'histoire des systèmes des parentés.
- Développer une "*gender archeology*" à la française ?
- Proposer et tester de nouveaux modèles des relations causales entre les différents aspects du genre (divisions des tâches, statuts sociaux, inégalités, organisation sociale, mobilité...) en intégrant les données de l'éthologie, l'anthropologie sociale, la génomique et l'archéologie...
- Réunir biologistes et sciences humaines pour discuter de modèles non réductionnistes des différences phénotypiques et comportementales hommes femmes, et recréer des échanges sereins après plusieurs décennies d'incompréhension mutuelle.

## RÉFÉRENCES

- Bachtrog, D., Mank, J. E., Peichel, C. L., Kirkpatrick, M., Otto, S. P., Ashman, T. L., Hahn, M. W., Kitano, J., Mayrose, I., Ming, R., Perrin, N., Ross, L., Valenzuela, N., Vamosi, J. C., & Tree of Sex Consortium (2014). Sex determination: why so many ways of doing it? *PLoS Biology*, 12(7), e1001899. doi: 10.1371/journal.pbio.1001899. PMID: 24983465; PMCID: PMC4077654.
- Bateman, A. J. (1948). Intra-sexual selection in *Drosophila*. *Heredity*, 2, 349-368.
- Bereni, L., Chauvin, S., Jaunait, A., & Revillard, A. (2020). Introduction aux études sur le genre. Deboeck Supérieur.
- Branco, S., Carpentier, F., Rodríguez de la Vega, R. C., Badouin, H., Snirc, A., Le Prieur, S., Coelho, M. A., de Vienne, D. M., Hartmann, F. E., Begerow, D., Hood, M. E., & Giraud, T. (2018). Multiple convergent supergene evolution events in mating-type chromosomes. *Nature Communications*, 9(1), 2000. doi: 10.1038/s41467-018-04380-9. PMID: 29784936; PMCID: PMC5962589.
- Chaix, R., David, B., Hoquet, T., Karlin, C., Lecointre, G., Pfefferkorn, R., Touraille, P., & Vignal, C. (2022). Aux origines du genre. *Reliefs*, MNHN.
- Coelho, S. M., Mignerot, L., & Cock, J. M. (2019). Origin and evolution of sex-determination systems in the brown algae. *New Phytologist*, 222(4), 1751-1756. doi: 10.1111/nph.15694. Epub 2019 Feb 21. PMID: 30667071.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species*. John Murray.
- Darwin, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. John Murray.
- Davidian, E., Surbeck, M., Lukas, D., Kappeler, P. M., & Huchard, E. (2022). The eco-evolutionary landscape of power relationships between males and females. *Trends in Ecology & Evolution*, 37, 706-718. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.04.004>.
- Fritzsche, K., Henshaw, J. M., Johnson, B. D., & Jones, A. G. (2021). The 150th anniversary of *The Descent of Man*: Darwin and the impact of sex-role reversal on sexual selection research. *Biological Journal of the Linnean Society*, 134, 525-540.
- Fromonteil, S., Marie-Orleach, L., Winkler, L., & Janicke, T. (2023). Sexual selection in females and the evolution of polyandry. *PLoS Biology*, 21(4), e3001916.
- Gowaty, P. A., & Hubbell, S. P. (2009). Reproductive decisions under ecological constraints: it's about time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 Suppl 1, 10017-10024. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901130106>
- Hare, R. M., & Simmons, L. W. (2019). Sexual selection and its evolutionary consequences in female animals. *Biol. Rev.*, 94, 929-956. doi:10.1111/brv.12484
- Hoquet, T. (2016). *Des sexes innombrables*. Seuil.

## RÉFÉRENCES

- Hoquet, T. (2022). *Le nouvel esprit biologique*. PUF.
- Janicke, T., Häderer, I. K., Lajeunesse, M. J., & Anthes, N. (2016). Darwinian sex roles confirmed across the animal kingdom. *Science Advances*, 2, e1500983.
- Jayachandran, S. (2015). The Roots of Gender Inequality in Developing Countries. *Annu. Rev. Econom.*, 7, 63–88.
- Johnson, M. G., & Shaw, A. J. (2016). The effects of quantitative fecundity in the haploid stage on reproductive success and diploid fitness in the aquatic peat moss *Sphagnum macrophyllum*. *Heredity*, 116, 523–530.
- Kwok, A., & Dorken, M. E. (2022). Sexual selection on male but not female function in monoecious and dioecious populations of broadleaf arrowhead (*Sagittaria latifolia*). *Proc. R. Soc. B*, 289, 20220919.
- Laland, K. N., Odling-Smee, J., & Myles, S. (2010). How culture shaped the human genome: bringing genetics and the human sciences together. *Nat. Rev. Genet.*, 11(2), 137–148. <https://doi.org/10.1038/nrg2734>
- Lemaître, J. F., Ronget, V., Tidière, M., Allainé, D., Berger, V., Cohas, A., ... Gaillard, J. M. (2020). Sex differences in adult lifespan and aging rates of mortality across wild mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(15), 8546–8553. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911999117>
- Lozano, M., Jiménez-Brobeil, S. A., Willman, J. C., Sánchez-Barba, L. P., Molina, F., & Rubio, Á. (2021). Argaric craftswomen: Sex-based division of labor in the Bronze Age southeastern Iberia. *J. Archaeol. Sci.*, 127, 105239.
- Luoto, S., Krams, I., & Rantala, M. J. (2019). A life history approach to the female sexual orientation spectrum: Evolution, development, causal mechanisms, and health. *Arch. Sex. Behav.*, 48(5), 1273–1308. <https://doi.org/10.1007/s10508-018-1261-0>
- Ly, G., Laurent, R., Lafosse, S., Monidarin, C., Diffloth, G., Bourdier, F., ... Chaix, R. (2019). From matrimonial practices to genetic diversity in Southeast Asian populations: The signature of the matrilineal puzzle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1780), <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0434>.
- Lynch, M. (2007). *The origins of genome architecture*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Marais, G.A.B., Gaillard, J.M., Vieira, C., Plotton, I., Sanlaville, D., Gueyffier, F., & Lemaître, J.F. (2018). Sex gap in aging and longevity: can sex chromosomes play a role? *Biological Sex Differences*, 9(1), 33. doi: 10.1186/s13293-018-0181-y. PMID: 30016998; PMCID: PMC6050741.
- Muyle, A., Shearn, R., & Marais, G.A. (2017). The Evolution of Sex Chromosomes and Dosage Compensation in Plants. *Genome Biology and Evolution*, 9(3), 627-645. doi: 10.1093/gbe/eww282. PMID: 28391324; PMCID: PMC5629387.
- Otto, S.P., & Lenormand, T. (2002). Resolving the paradox of sex and recombination. *Nature Reviews Genetics*, 3(4), 252-261. doi: 10.1038/nrg761. PMID: 11967550.
- Palmer, D.H., Rogers, T.F., Dean, R., & Wright, A.E. (2019). How to identify sex chromosomes and their turnover. *Molecular Ecology*, 28(21), 4709-4724. doi: 10.1111/mec.15245. Epub 2019 Oct 10. PMID: 31538682; PMCID: PMC6900093.
- Racimo, F., Sikora, M., Vander Linden, M., Schroeder, H., & Lalueza-Fox, C. (2020). Beyond broad strokes: sociocultural insights from the study of ancient genomes. *Nature Reviews Genetics*, 21, 355–366. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/s41576-020-0218-z>.
- Raymond, M., Turek, D., Durand, V., Nila, S., Suryobroto, B., Vadez, J., Barthes, J., Apostoulou, M., & Crochet, P.A. (2022). Increased birth rank of homosexual males: Disentangling the older brother effect and sexual antagonism hypothesis. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.02.22.481477>.
- Renner, S.S., & Müller, N.A. (2021). Plant sex chromosomes defy evolutionary models of expanding recombination suppression and genetic degeneration. *Nature Plants*, 7(4), 392-402. doi: 10.1038/s41477-021-00884-3. Epub 2021 Mar 29. PMID: 33782581.
- Reynolds, Z., Wander, K., Sum, C., Su, M., Thompson, M. E., Hooper, P.L., ... Blumenfeld, T. (2021). Matriliney reverses gender disparities in inflammation and hypertension among the Mosuo of China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(37), <https://doi.org/10.1073/pnas.2112699118>.
- Rivollat, M., Thomas, A., Ghesquière, E., Rohrlarch, A.B., Späth, E., Pemonge, M.-H., Haak, W., Chambon, P., & Deguilloux, M.-F. (2022). Ancient DNA gives new insights into a Norman Neolithic monumental cemetery dedicated to male elites. *PNAS*, 119(18).
- Sanderson, S.K., Heckert, D.A., & Dubrow, J.K. (2005). Militarist, Marxian, and non-Marxian materialist theories of gender inequality: A cross-cultural test. *Social Forces*, 83, 1425–1442.
- Smith, J. Maynard. (1971). What use is sex? *Journal of Theoretical Biology*, 30(2), 319-335.
- Sparacello, V.S., Villotte, S., Shackelford, L.L., & Trinkaus, E. (2017). Patterns of humeral asymmetry among Late Pleistocene humans. *Comptes Rendus Palevol*, 16, 680–689.
- Thomas, A. (2022). Faire parler les morts : comportements des hommes et des femmes néolithiques. In C. Darmangeat & A. Augereau (Eds.), *Aux origines du Genre* (pp. 77-86). PUF/La vie des idées.
- Tonnabel, J., David, P., Janicke, T., Lehner, A., Mollet, J.C., Pannell, J.R., & Dufay, M. (2021). The scope for postmating sexual selection in plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 36, 556-567.
- Tonnabel, J., David, P., & Pannell, J.R. (2019). Do metrics of sexual selection conform to Bateman's principles in a wind-pollinated plant? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286, 20190532.
- Tree of Sex Consortium. (2014). Tree of Sex: a database of sexual systems. *Scientific Data*, 1, 140015. doi: 10.1038/sdata.2014.15.
- Villotte, S., & Knüsel, C.J. (2014). "I sing of arms and of a man...": medial epicondylitis and the sexual division of labour in prehistoric Europe. *Journal of Archaeological Science*, 43, 168–174.
- Weber, A.M., Cislighi, B., Meausoone, V., Abdalla, S., Mejía-Guevara, I., Loftus, P., Hallgren, E., Seff, I., Stark, L., Victora, C.G., et al. (2019). Gender norms and health: insights from global survey data. *The Lancet*, 393, 2455–2468.
- Willson, M.F. (1990). Sexual selection in plants and animals. *Trends in Ecology & Evolution*, 5, 210-214.
- Zeng, T.C., Aw, A.J., & Feldman, M.W. (2018). Cultural hitchhiking and competition between patrilineal kin groups explain the post-Neolithic Y-chromosome bottleneck. *Nature Communications*, 9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-04375-6>.

# de la **Le passé,** dizaine au milliard d'années, au service **du présent** & **du futur**

Auteurs : Charline Giguët-Covex (EDYTEM), Catherine Larose (Ampère), Alexandra Schuh (PACEA), Boris Vannière (MSHE & OCCR)

Contributeurs : Jean-Renaud Boisserie (PALEVOPRIM), Sébastien Joannin (ISEM), Catherine Larose (Ampère), Thomas Servais (EVO-ECO-PALEO), Antoine Souron (PACEA)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Favoriser les appels à projet « toutes thématiques » incluant une approche temporelle pluri-décennale et au-delà, et des travaux d'observation et/ou de modélisation du passé à visées exploratoires
- ▶ Mettre en place des outils pour la conservation et l'analyse des données de recherche anciennes et futures
- ▶ Rallonger la durée des thèses et des projets de recherche d'une année en moyenne afin d'augmenter la qualité des travaux pour des expériences d'immersion et une maîtrise plus aboutie de l'interdisciplinarité et du dialogue avec la société

## Introduction

L'expérience du « temps » est une des grandes questions en écologie et évolution, davantage aujourd'hui, méritant d'être mise en avant comme une réponse à la précipitation qui nous guette face au changement global en cours. Nos comportements, réflexions et actions en tant qu'humains sont guidés et influencés par les histoires et récits du passé. Dans le contexte actuel de défis environnementaux, climatiques et sociaux sans précédent, notre mémoire du passé n'est pas assez lointaine et pas assez riche des expériences vécues par la nature et les sociétés (Colombaroli *et al.*, 2017 ; Dubois *et al.*, 2017 ; Fischer *et al.*, 2018 ; Gillson, Marchand, 2014). Peut-on concevoir un avenir sans expérience et sans mémoire du passé ? Pourquoi et quel intérêt peut-il y avoir à étudier le passé ?

Cet atelier invite à une réflexion fondamentale mais aussi appliquée sur l'usage du passé, non seulement d'un point de vue narratif, mais également comme outil de la démarche scientifique, car il ouvre à des temporalités et des échelles de temps uniques pour appréhender les processus écosystémiques, les boucles de rétroactions qui gouvernent le système Terre et les interactions sociétés/environnements (Crucifix *et al.*, 2017 ; Gillson *et al.*, 2017, 2022 ; Latorre *et al.*, 2016). Quels sont les intérêts des approches temporelles ? Comment maîtriser et décomposer les processus suivant des échelles temporelles et spatiales différenciées ? Dynamique, trajectoire, bascule et héritage, quels sont les enjeux de la paléoperspective ?

Si la mémoire est un trésor à partager, c'est aussi une arme qui peut être manipulée ou un savoir que l'on ignore, volontairement ou pas. Les scientifiques, une fois de plus, peuvent faire le lien et créer du sens dans ces expériences passées pour éviter les pièges de l'ignorance face aux risques environnementaux et leurs conséquences socioéconomiques et écologiques trop souvent non assumés par nos sociétés modernes. L'exploration du passé est également une invitation à développer la curiosité et la modestie au regard d'une compréhension plus nuancée des similarités entre l'humain et le reste du monde vivant. Quelles sont alors les priorités et les orientations

à privilégier en paléosciences, faut-il en avoir, et comment les définir ? Comment combler le fossé entre l'actuel et ses enjeux, et les expériences passées ?

En s'attachant à comprendre les éco- et anthroposystèmes, les interactions complexes entre leurs nombreux constituants et leurs changements sur des échelles de temps longues – depuis l'origine de la vie jusqu'à l'actuel – les sciences du passé ou paléosciences (géologie, paléontologie, paléoécologie, archéologie, histoire) représentent des sources essentielles pour comprendre le temps passé et ainsi informer le présent et le futur. Comment alors appréhender et documenter au mieux le passé ? Quels principes et quelles méthodes en sciences du passé faut-il promouvoir ?

Pour documenter toutes ces questions, nous proposons ici un texte sur le thème de la mémoire « environnementale » dans la société – comment le passé peut-il être au service du présent et du futur ? Ce texte rend compte des contributions et échanges réalisés entre tous les participants à l'atelier « Le passé, de la dizaine au milliard d'années, au service du présent et du futur » des prospectives de CNRS Écologie & Environnement. Il est décomposé en trois parties abordant successivement le pourquoi, les temporalités<sup>1</sup> et les priorités en sciences du passé telles qu'elles pourraient contribuer à la politique scientifique de CNRS Écologie & Environnement dans les années à venir.

1) La mythologie grecque identifie trois temporalités différentes et intéressantes :

- Chronos incarne le temps qui défile de manière linéaire, il fait écho à des tendances sur le long terme, impossibles à percevoir sans étude du passé ;

- Aiôn représente le temps qui se répète comme celui des saisons et, à long terme, les cycles orbitaux de la terre tels que ceux décrits par Milutin Milankovic ;

- Kairos incarne « l'inattendu », c'est-à-dire un basculement avec un « avant » et un « après », il rappelle les concepts de tipping points, transitions critiques et d'événements extrêmes qui interviennent avec des fréquences variables souvent hors de portée des observations courantes et seulement accessibles par des reconstructions du passé.

## Le pourquoi ou l'affirmation des sciences du passé : quel est l'intérêt d'étudier le passé ?

Les recherches qui documentent, analysent et interprètent le passé de la Terre, de ses écosystèmes et des sociétés recouvrent un très vaste domaine de connaissances avec une très grande variété d'usages et d'impacts. Ces recherches s'étendent à l'ensemble du domaine des sciences de la Terre et de ses écosystèmes, l'histoire de l'humanité et des sociétés selon des approches aussi variées que la géologie, les paléoenvironnements, la paléontologie, la paléoécologie, la paléoclimatologie, l'anthropologie, l'archéologie, l'histoire et bien d'autres. Il semble utile, dans

le contexte actuel, de faire un tour d'horizon de ces approches et de faire valoir le potentiel des sciences du passé, à la fois pour mieux communiquer sur leur intérêt et pour élaborer la feuille de route de leurs contributions, à la recherche scientifique dans son ensemble et à l'évolution de la société et de son rapport à la nature en particulier. Il s'agit notamment de définir la multitude des apports potentiels de la recherche sur le passé à l'identification, l'analyse, la compréhension ou encore la gestion des enjeux socio-environnementaux contemporains et à venir.

### Comment les données du passé, mêmes incomplètes, peuvent-elles aider à comprendre la complexité du monde actuel ?

La diversité des disciplines, des méthodes et des approches couvertes par les sciences du passé permet d'aborder l'ensemble des questionnements autour des enjeux socio-environnementaux actuels. Quelques exemples illustrant la diversité des sujets traités et montrant comment les connaissances acquises sur notre passé peuvent être utilisées pour comprendre notre monde d'aujourd'hui et réfléchir à celui de demain, sont présentés ci-dessous.

L'étude des archives naturelles par des approches sédimentologiques, géochimiques, minéralogiques, isotopiques, l'analyse des microfossiles ou encore de molécules spécifiques permettent de documenter la réponse de divers écosystèmes et des cycles biogéochimiques aux changements globaux. Les archives naturelles renferment également des indices des changements climatiques passés. Toutes ces connaissances uniques peuvent apporter des arguments permettant d'orienter les décideurs dans leurs choix : doit-on agir avec des technologies « innovantes » ou promouvoir les rétroactions naturelles apprises du passé ? Les sciences du passé fournissent aussi des reconstitutions sur plusieurs millénaires des activités humaines passées telles que l'usage des terres, l'exploitation et/ou la gestion des ressources, ce qui permet de questionner nos stratégies de gestion/adaptation actuelles, notamment en termes de durabilité, et les temporalités de cette « durabilité » sous-entendues (Bajard *et al.*,

2017 ; Dearing *et al.*, 2008 ; Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2021). Concernant le devenir des espèces sauvages et/ou domestiques (diffusions, expansions, déclin, extinctions), les études du passé fournissent des exemples permettant d'imaginer les bouleversements écologiques induits auxquels on peut s'attendre dans les décennies et siècles à venir (Alsos *et al.*, 2022 ; Connor *et al.*, 2021 ; Liu *et al.*, 2021). L'étude des migrations démographiques et des métissages biologiques et culturels humains passés permet de définir les échelles géographiques et temporelles utiles à leur analyse face au bouleversement climatique en cours.

D'un point de vue théorique, les sciences du passé, par l'analyse des archives sédimentaires et/ou biologiques, apportent le recul nécessaire pour accéder à des référentiels dits « naturels » et ainsi mieux appréhender l'impact des sociétés depuis la Préhistoire, et plus particulièrement avec le développement des grandes civilisations, et surtout de nos économies ou modes d'exploitation modernes (Bennion *et al.*, 2011). Elles permettent aussi de mettre en perspective les observations actuelles, par exemple sur l'évolution des écosystèmes et du climat, avec pour défi de réconcilier les échelles temporelles de l'observation et de la « rétro-observation » (Battarbee *et al.*, 2005). Cette prise de recul apportée par les sciences du passé est indispensable pour démontrer l'existence et évaluer l'ampleur

des changements globaux dans toutes leurs composantes environnementales et climatiques (Vannière *et al.*, 2016 ; Power *et al.*, 2008).

Un autre atout des sciences du passé est de produire des données multi-indicateurs intégrées dans des approches systémiques visant à mettre en exergue à la fois les forçages et les impacts, et permettant de proposer des hypothèses sur les mécanismes sous-jacents (Dearing *et al.*, 2012 ; Feurdean *et al.*, 2020). Cela permet notamment de mettre en évidence la complexité du fonctionnement des éco- et anthroposystèmes et d'investiguer cette complexité temporelle complémentaire aux autres sciences d'observation et/ou de modélisation actuelles et subactuelles (Dearing *et al.*, 2010 ; Lestienne *et al.*, 2022).

D'une part, cette mise en évidence de la complexité nous alerte et nourrit le principe de précaution ; les sciences du passé se doivent alors d'accompagner la prise de décision dans les politiques territoriale, environnementale et climatique (Birck *et al.*, 2014). Les échelles temporelles des processus environnementaux et climatiques peuvent être bien plus longues que celles d'une

vie humaine. Les sciences du passé ont donc un rôle à jouer pour intégrer la profondeur du temps et les processus lents dans les réflexions politiques et les stratégies de gestion (Dearing *et al.*, 2010 ; Gillson *et al.*, 2017).

D'autre part, les sciences du passé nous apportent une multitude de connaissances devant nous permettre de faire reculer les théories fixistes encore bien trop partagées par les sociétés humaines à l'échelle de la planète. Elles permettent de remettre en cause ou réinterroger des paradigmes, tels que celui des premiers peuplements de l'Amérique longtemps attribués à la culture du peuple Clovis émergeant vers 13500 ans avant aujourd'hui (Becerra-Valdivia & Higham, 2020 ; Braje *et al.*, 2017 ; Hebda *et al.*, 2022 ; Pedersen *et al.*, 2016).

Finally, bien que beaucoup de connaissances acquises par les sciences du passé aient une utilité immédiate pour nos sociétés d'aujourd'hui, d'autres ne présentent pas, ou pas encore, d'application et de valorisation, du moins de prime abord. Elles restent cependant acquises et doivent être également diffusées au plus grand nombre.

### Les sciences du passé : vers un outil pour les décideurs

Les connaissances apportées par les sciences du passé peuvent ou devraient probablement imprégner plus profondément les politiques de gestion (Dearing *et al.*, 2019 ; Gillson *et al.*, 2022), en particulier dans le contexte actuel d'un recours à des stratégies interventionnistes. Bien qu'il n'y ait rien d'évident ou de certain à observer le passé, les sciences du passé peuvent prétendre expliquer ce qui se passe et nourrir notre prospective sur ce qui pourrait se passer, contribuer à anticiper et donc aider à prévenir. D'une part, seule la conjugaison de plusieurs temporalités permet d'appréhender la notion d'héritage dans l'analyse du présent et la préparation de l'avenir. D'autre part, comparé à l'unicité du présent, la multitude des passés de la terre, plus ou moins lointains, sont les seuls à offrir plusieurs stratégies et futurs possibles.

Les sciences du passé ne sont pas uniquement théoriques, elles s'appuient sur des mesures de variables qui reflètent l'évolution passée du système Terre, des éco- et anthroposystèmes. Ces

mesures qui nourrissent ou valident des modèles fonctionnels ou prédictifs dans certains cas sont donc essentiellement pratiques, utilisables pour *a minima* documenter, comprendre et décider. La société a une envie de connaissance, de savoirs, de savoir d'où l'on vient. Cet appétit se veut rassurant pour envisager un avenir dans lequel il paraît impossible de s'engager sans expérience et sans mémoire du passé. Alors, comment promouvoir ces connaissances et faire en sorte qu'elles imprègnent nos politiques de gestion ?

Les sciences du passé ont un rôle majeur à jouer dans l'éducation scientifique afin de participer dès maintenant à la définition des enjeux sociétaux, environnementaux et économiques d'une part, et afin de faciliter la maîtrise des différentes échelles de temps par tous les futurs gestionnaires et décideurs d'autre part. L'étude des origines multiples et complexes, des processus et rétroactions séculaires   millénaires et la diffusion de ces savoirs à tous les niveaux de la société doivent permettre une prise de conscience



de la nature de nos liens avec le reste du vivant, de nos cadres de vie, des temporalités de la planète et de celles des humains et de leurs fragilités respectives. Elle doit aussi permettre de lutter contre une forme d'amnésie écologique qui fait prendre pour point de référence un état hérité d'une succession de perturbations passées d'origines parfois totalement anthropiques. Le passé est une mine de connaissances encore à peine exploitée. Les données acquises par les sciences du passé pourraient être utilisées

pour générer des bibliothèques de cas (Messerli *et al.*, 2000). Des exemples, qui illustrent les relations de causes et conséquences, les temporalités des interactions et processus, et qui paraissent indispensables pour avancer dans des stratégies de gestion et de développement décennal à séculaire durables. Les données des sciences du passé pourraient également éclairer l'idée visant à multiplier la diversité des modes de gestion afin de maintenir la diversité, à toutes les échelles du vivant.

## **L'épreuve du temps : dynamique, trajectoire, bascule et héritage ; enjeux de la paléoperspective, intérêts des approches temporelles !**

Dans quelle mesure est-il nécessaire de connaître les mécanismes propres à chaque échelle de temps, de l'année au milliard d'années, pour comprendre la dynamique des écosystèmes aujourd'hui ?

Chaque situation résulte d'une évolution ponctuée par des moments clés qui peuvent constituer des tournants ou des ruptures. Les recherches sur le passé permettent d'établir ces trajectoires, ces périodes de bascule ou de changement qui fondent le pourquoi et le comment de nos socioécosystèmes (Dearing, 2008 ; Dearing *et al.*, 2010 ; Giguet-Covex *et al.*, 2023). Cette épreuve du temps constitue

donc un héritage unique et indispensable pour comprendre notre présent et envisager le futur. Comment les études des dynamiques et limites systémiques passées peuvent-elles peser dans l'analyse des anthroposystèmes actuels et la mise en place des stratégies de gestion pour l'avenir ? Quelle est la part héritée de l'histoire passée en regard des forçages modernes dans le fonctionnement actuel et futur des socioécosystèmes ? Comment évaluer le poids potentiel et la durée d'impact possible des choix socioéconomiques et environnementaux présents sur les dynamiques (trajectoires, points de bascule) écosystémiques et climatiques futures ?

### **Qu'entend-on par notion d'héritage ?**

La notion d'héritage comporte plusieurs facettes. Une des facettes de cette notion repose sur la trajectoire suivie par l'écosystème<sup>2</sup> étudié. Cette trajectoire, intégrant des tournants et des ruptures, pèse de manière évidente sur l'état actuel de nos écosystèmes par ailleurs soumis à de nouveaux forçages climatiques, anthropiques, géologiques... Les derniers tournants, ruptures, changements d'état conditionnent fortement l'état actuel des systèmes/écosystèmes étudiés. Ces moments-clés peuvent être plus ou moins anciens. Il est indispensable de connaître

cette trajectoire et les mécanismes sous-jacents pour comprendre où nous en sommes aujourd'hui et vers quoi nous nous dirigeons (Dearing *et al.*, 2010). Il est aussi important de connaître le poids de cet héritage car celui-ci va influencer la réponse du système aux forçages actuels. Il conditionne en quelque sorte la sensibilité actuelle et future du système aux nouveaux forçages. Les approches pluridisciplinaires (histoire, politique, sociologie, paléobiologie, archéologie...) permettent d'intégrer et de mieux comprendre la complexité des trajectoires des écosystèmes.

2) L'écosystème ici intègre les sociétés humaines. Il est préféré au terme « socioécosystème », car les humains et par extension les sociétés qu'ils ont créées, font partie intégrante de l'écosystème. Ce terme permet sans doute de mieux illustrer l'imbrication et la complexité des interactions sociétés/environnements, et de ne pas mettre en opposition l'humanité et la « nature ».

Quelques exemples illustrent cette notion d'héritage et son poids potentiel :

- L'activité humaine passée a diminué la biodiversité des forêts et a impacté leur fonctionnement. Dans certains cas, ces milieux sont devenus plus sensibles aux stress climatiques et environnementaux (Spiecker, 2003), ce qui engendre des répercussions sur leur système de gestion. Quels arbres peut-on planter ? Quelles espèces peuvent être réintroduites ?
- Le passage d'un paysage forestier à un paysage agricole a pour conséquence de rendre plus sensible les sols aux processus d'érosion. La réponse du système à une augmentation des précipitations sera donc accentuée (Giguet-Covex *et al.*, 2012).
- Les fluctuations climatiques passées influencent la migration des animaux et celle des sociétés (Castañeda *et al.*, 2009 ; Hoffmann *et al.*, 2016). La distribution actuelle des espèces et des populations résulte en partie de ces changements passés.
- La transformation par les sociétés humaines des systèmes fluviaux, par exemple pour l'exploitation des graviers, est un héritage actif qui a des conséquences multiples et durables :

incision du lit, niveau d'eau, stabilité des rives, modifications écologiques (Costea, 2018). On ne peut recréer de la charge de gravier. Il y a ici un découplage dans la résolution des processus de production des graviers et la vitesse d'exploitation de cette ressource.

Une autre facette de la notion d'héritage est celle que l'on pourrait qualifier de « mémoire et oubli ». Elle est très bien illustrée par les stocks plus ou moins anciens de matières contaminantes, par exemple le plomb antique/médiéval, les pesticides, les plastiques, qui sont remobilisés et rejetés dans l'environnement ultérieurement (Bajard *et al.*, 2018 ; Guillevic *et al.*, 2023 ; Mottes *et al.*, 2022 ; Sabatier *et al.*, 2014). L'identification de ces zones de stockage et la quantification des stocks et des rejets peuvent être réalisées par des mesures *in situ* : l'instrumentation, ou encore le recours aux archives historiques lorsqu'il s'agit de polluants produits et utilisés récemment. En revanche, cet examen est beaucoup moins évident pour les productions anciennes considérées comme « oubliées », ce qui rend difficile l'identification de la contribution de cet héritage potentiel. Cette facette de la notion d'héritage, au contraire de la précédente, ne s'appuie pas sur une continuité temporelle mais superpose en quelque sorte différentes temporalités.

### **Étude des trajectoires passées et futures des écosystèmes : importance de la prise en compte des échelles temporelles et spatiales des processus et défis associés**

#### **Emboîtement d'échelles des processus**

Un des défis actuels est l'articulation entre les différentes échelles non seulement temporelles, mais aussi spatiales des processus régissant le fonctionnement des écosystèmes et donc leur trajectoire. Les interactions ou imbrications entre ces différentes échelles peuvent rendre complexe la compréhension et l'étude de l'évolution des écosystèmes. Par exemple, des rétroactions peuvent se dérouler à différentes échelles : il peut exister de l'inertie à la suite d'une action. Ces questions d'emboîtement d'échelles et d'interactions temporelles peuvent être explorées, notamment à l'aide de modèles mécanistiques.

#### **Résolution temporelle des études**

Les sciences du passé permettent d'accéder à la profondeur du temps, mais pas toujours à la résolution temporelle nécessaire pour obtenir des enregistrements comparables à ceux des observations des changements actuels, ce qui constitue une des limites à leur compréhension et donc à l'extrapolation des changements futurs. Par exemple, en ce qui concerne les mesures de concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et les relations avec la température, sur de longues échelles de temps (Mills *et al.*, 2019), nous ne sommes pas capables de capter des variations à haute résolution

temporelles alors que les changements observés aujourd'hui s'opèrent rapidement. Il est donc difficile d'évaluer plus précisément, à l'échelle de temps correspondant à la contribution anthropique notamment, le rôle du CO<sub>2</sub> et d'autres gaz sur les variations de la température globale et des océans en particulier. On a ici un exemple concret illustrant la difficulté de réconcilier les échelles temporelles de l'observation et de la « rétro-observation » avec les implications sur notre capacité de compréhension des phénomènes. Nos disciplines s'appuient aussi beaucoup sur le paradigme de l'actualisme, c'est-à-dire sur l'idée que les mêmes causes ont eu les mêmes effets aujourd'hui et hier. Mais est-ce toujours applicable ? Ceci peut être vu comme une limite de l'utilisation des sciences du passé et doit être expérimenté, car, pour prévoir demain, on ne peut pas non plus uniquement s'appuyer sur la compréhension des mécanismes actuels d'autant que le passé peut offrir un éventail des possibles plus large.

### **Projection et temporalité**

La prise en compte des échelles temporelles des processus est essentielle pour la prédiction, ou plutôt la projection, de scénarios futurs. Il faut intégrer une symétrie passée/future dans la distance temporelle et la résolution des processus, rechercher la résolution et la profondeur temporelle correspondant précisément à la dynamique étudiée. Un exemple probant est la question de l'extinction, ou plutôt de l'érosion de la biodiversité, et de sa perception au cours du temps ; en fonction de l'échelle temporelle à laquelle on se place, l'appréciation du phénomène et ses implications correspondent à des enjeux différents. Toutes les espèces seraient-elles amenées à disparaître ?

### **Débloquer les verrous**

Relever les défis autour des questions des échelles de temps nécessite non seulement de fournir des efforts pour augmenter la résolution temporelle et spatiale de nos études, mais également de développer les méthodes d'analyses et les outils adéquats (Seddon *et al.*, 2014). Intégrer au sein de projets uniques

des approches de suivis environnementaux, de rétro-observation, d'expérimentation et de modélisation est probablement une des clés pour mieux comprendre les processus et les échelles de temps et d'espaces auxquels ils opèrent.

De la mer Méditerranée à l'océan profond, des écosystèmes construits par les sociétés humaines depuis des millénaires à ceux encore « vierges » ; il existe, pour chacun d'entre eux, une urgence à en comprendre les temporalités et l'équilibre « durable ». Les fronts pionniers de colonisation moderne pour l'exploitation des ressources minérales ou simplement l'étendue des terres agropastorales, tels qu'en forêts tropicales, dans les grands deltas et marais de la planète (comme en Amazonie ou au Congo), ou encore dans les écosystèmes des hautes latitudes, manquent cruellement d'appréciation des impacts à moyen et long termes des actions qui y sont menées. Les travaux de recherche sur ces temporalités et ces espaces clés représentent l'épsilon des investissements consentis à l'exploitation et empêchent toute discussion équilibrée vis-à-vis des enjeux environnementaux et de leurs implications socioéconomiques face aux bulldozers de la « croissance » et de son appétit gargantuesque pour les ressources de toutes sortes. Il paraît indispensable de débloquer le verrou de la durabilité de nos actions en mesurant leur coût environnemental à moyenne et longue échelle de temps en valeurs écologique, sociale et économique.

## Priorités et orientations de la recherche sur le passé : faut-il en avoir ? Comment les définir ?

L'établissement de priorités de recherche et d'orientations stratégiques dans le domaine des sciences écologiques et environnementales répond-il à un besoin défini par les enjeux actuels et futurs ou s'agit-il d'un leurre face à notre ignorance du passé et aux inconnues à venir ? L'immensité du passé et des futurs nous invite aussi à faire des choix, à prioriser l'effort de recherche mais aussi à garantir la découverte inattendue. Par exemple, les travaux sur les flores du Carbonifère ne présageaient pas, mais ont été fort utiles à l'essor de l'industrie du charbon au XIX<sup>e</sup> siècle qui a été identifiée plus

récemment comme une des causes du changement climatique en cours. Il s'agit donc de définir des orientations thématiques de recherche incluant la recherche sur le passé et basées sur les motivations du présent, tout en préservant si possible la diversité des approches, des objets et des périodes d'études. Quelles sont donc les motivations qui pourraient présider aux choix de thématiques de recherche prioritaires, et comment préserver la diversité des spécialités de recherche pour garantir une anticipation de tous les possibles et une recherche aux frontières de la connaissance ?

### **Le changement global : une évidente priorité reflétant les enjeux actuels à toutes les échelles spatiales**

L'histoire des sciences montre que la fabrication des connaissances est conjoncturelle ; cette énergie créatrice de savoirs et de sciences émane des aspirations politiques, sociales, culturelles, économiques et environnementales des sociétés à des moments-clés de leur histoire. La science répond donc à des questions de sociétés contemporaines de celles-ci ou inscrites dans une trajectoire d'évolution de ces mêmes sociétés. Les exemples les plus évidents aujourd'hui sur le plan environnemental concernent bien évidemment le réchauffement climatique et la perte de la biodiversité. Ceux-ci s'imposent aux sociétés, et quelles qu'en soient les réponses possibles : conservation, mitigation ou adaptations, il y a un besoin urgent de connaissances sur les implications et risques à venir, sur les chaînes de processus et les mécanismes de rétroactions, et sur la réalité de ce qu'il peut advenir si l'on ne fait rien, pas assez, ou pas ce qu'il aurait fallu. Il y a donc certainement un enjeu de priorités quand il s'agit de donner des perspectives temporelles et mécanistiques concrètes à un sujet brûlant d'actualité (IPCC, 2021).

Notre compréhension partielle et notre manque de réactivité face à ce qui se joue actuellement, s'expliquent en partie par notre méconnaissance du passé. En effet, il semble difficile d'argumenter que mieux connaître notre passé,

l'histoire environnementale et la vie de la Terre puissent ne pas être utiles et/ou n'avoir aucune applicabilité. L'étude du passé ne peut pas être considérée comme une recherche fondamentale aux débouchés incertains, puisque cette connaissance représente l'un des outils fondamentaux de la prise de décision quant à la gestion temporelle des écosystèmes et environnements actuels et futurs. L'intérêt socio-économique des recherches en sciences du passé réside donc dans la maîtrise et l'expertise acquise sur les processus et trajectoires passées. Dans cette logique, les observations de nos environnements et écosystèmes aujourd'hui incompris peuvent être ce qui préside en partie aux choix des priorités de recherche sur le passé. Il s'agit d'une approche actualiste ou contemporanéiste de la stratégie visant à établir les priorités de recherche. Les observations et enjeux ne manqueront certainement pas, mais les limites de la recherche « au présent » s'établissent dans le fait que celle-ci est intrinsèquement liée à l'actualité, qui est un prisme grossissant et altère ainsi notre intérêt pour des enjeux à d'autres échelles de temps, moins évidents à nos yeux aujourd'hui. Par exemple, concernant la question de l'érosion de la biodiversité, on est probablement trop enclin à donner beaucoup d'importance à la protection de certaines espèces emblématiques. Il pourrait être essentiel de cibler aussi des espèces clés des chaînes

trophiques afin de préserver un maximum de services écosystémiques, tout en continuant les actions de communications indispensables

pour convaincre et recueillir l'adhésion à un investissement public dans la gestion durable des écosystèmes et du système Terre.

### **Favoriser une science de tous les possibles : une nécessité**

L'étude du passé et les paléosciences se définissent respectivement comme une seule et une multitude de spécialités scientifiques couvrant un domaine aussi vaste que l'univers, la vie et les sociétés réunis. Depuis plusieurs années maintenant, la recherche s'appuie sur des approches intégratives combinant plusieurs disciplines, méthodes et/ou indicateurs. Cependant, la pratique se heurte bien souvent à des difficultés épistémologiques, théoriques ou encore parfois structurelles qui limitent la réalisation de ces travaux aux interfaces. Il s'agit donc aussi d'établir les jalons pour dépasser ces limites et accélérer la mise en pratique quotidienne de recherches intégratives, inter- et transdisciplinaires en sciences du passé.

Par ailleurs, malgré l'évidence que représentent certains enjeux actuels dans l'établissement des priorités de recherche sur le passé, considérer seulement les sciences du passé comme un ensemble de disciplines à « buts déterminés » semble risqué. Une recherche tous azimuts dans le passé, guidée principalement par la qualité de la démarche scientifique, semble également nécessaire. Sans faire de la sérendipité une fin en soi, il est important d'établir la recherche sur le passé au travers d'une grande diversité de sujets, dans de multiples directions et de spé-

cialités avec pour objectif à court, moyen et long terme, d'étendre nos connaissances sans limites prédéterminées. Il y a une nécessité d'inscrire les priorités de recherche sur le passé dans une logique à la fois de conservation et d'extension de la diversité des profils et des compétences (disciplinaires, thématiques, méthodologiques, chronologiques...), d'investir dans l'interdisciplinarité des parcours de recherche, tout autant que de favoriser l'émergence de nouvelles disciplines et/ou technologies. Pour cela, il apparaît primordial de continuer à soutenir les travaux d'observation et de documentation à visées exploratoires, sans lien direct et nécessaire avec le présent, qui puissent préfigurer l'analyse et la compréhension d'enjeux inconnus et l'acquisition de connaissances originales. Ces travaux contribuent alors à nourrir petit à petit la diversité des savoirs communs, telle une « grande » base de données sur le passé ouverte vers le futur représentant une conscience universelle, socle des choix à venir. Cela doit inévitablement s'accorder avec un renforcement des programmes et stratégies sur l'inventaire, l'archivage, la gestion et la réutilisation des données de la recherche existantes et futures, selon les principes récemment établis de la science ouverte entre partenaires académiques, mais aussi pour et avec la société.

### **Propositions**

L'accessibilité aux données et l'interdisciplinarité associée à une amélioration de la communication entre chercheurs apparaissent comme des priorités centrales au sein de la communauté scientifique travaillant sur le passé et au-delà. Premièrement, la mise en place d'outils pour la conservation, l'analyse et la mise en relation des données de recherche anciennes et récentes constituent une préoccupation majeure. En effet, l'accumulation et le traitement des données représentent des enjeux auxquels une réponse efficace se doit d'être proposée afin de favoriser l'établissement de modèles prédictifs à grande échelle, non seulement dans le temps,

mais aussi à une échelle mondiale (Goring et al., 2015 ; Seddon et al., 2014 ; Williams et al., 2018). Le partage de données à travers une science plus ouverte favoriserait également l'émergence d'une science plus « écologique », en accord avec les enjeux actuels. Enfin, le croisement de disciplines pour répondre à une question scientifique représente un moyen indispensable de proposer une science de qualité. En cela, la diversité des spécialités de recherche sur le passé ainsi que la variabilité des expériences doivent être entretenues de toutes les manières. Pour ce faire, la capacité de monter des projets en partenariat avec des

chercheurs de différents horizons est indispensable, elle doit être favorisée par la création d'outils permettant une identification mutuelle et une communication plus facile entre ces derniers. Il serait pour cela utile d'établir une cartographie fine et accessible à toutes et tous des compétences et expertises de recherche dans les sciences du passé afin de permettre une recherche spontanée et un réseautage efficace pour le montage de projets. Par ailleurs, les sciences du passé ont besoin de développer des « avenues », au-delà des ponts actuels, avec les sciences du présent dans leur ensemble (par exemple l'agronomie, l'hydrologie, l'écologie, l'écotoxicologie) et plus spécifiquement avec les sciences exactes (telles que les mathématiques, la physique/chimie...), mais aussi les sciences sociales (sociologie, économie...). Ces rapprochements apparaissent essentiels pour avancer sur la compréhension des trajectoires, pour quantifier, modéliser et mesurer les effets et conséquences de nos actions, pour proposer des projections avec les incertitudes associées, indispensables à l'évaluation des risques géosystémiques, écologiques et sociétaux (Dearing *et al.*, 2015 ; Seddon *et al.*, 2014).

Un des moyens indispensables pour faire émerger des priorités basées sur l'excellence et les compétences existantes est probablement de favoriser les appels à projet « blancs ». Cela permet de préserver une vision pragmatique de la politique scientifique dans un domaine aussi large que la recherche sur le passé en général. Nous retiendrons aussi l'intérêt que l'on pourrait avoir à promouvoir la recherche au sein d'une plus grande diversité de « figures » écosystémiques emblématiques telles que l'océan profond, les forêts tropicales, les grands deltas, le bassin méditerranéen, les milieux de montagne, les zones arides et bien d'autres milieux à forts enjeux d'exploitation, de vie et de durabilité. Il y a depuis quelques années des focus de recherche sur des espaces géographiques de dimension mondiale, comme l'Arctique, et d'autres anthroposystèmes d'échelle plus régionale, étudiés dans le cadre des observatoires homme/milieu (OHM) ou des zones ateliers (ZA). Ces expériences acquises peuvent certainement en ouvrir de nouvelles concernant des terrains et espaces différents, qui seront sources de diversification et de développement d'études interdisciplinaires à long terme. Cette

ouverture pourrait alors contribuer à une veille active de plus grande échelle sur l'avenir et les enjeux environnementaux de notre planète. Nous proposons que soient avant tout promus les travaux qui documentent et analysent les enjeux pluridécennaux à pluriséculaires, se rapportant à divers choix de gestion et d'exploitation environnementale, et qui nous permettent donc de regarder au-delà du cadre trop étroit d'une seule génération de décideurs. Thématiquement, il s'agit de mettre la question des temporalités environnementales au cœur des priorités de la programmation scientifique.

Une autre piste pour promouvoir les approches intégratives devrait inclure l'expérience de cette démarche le plus tôt possible dans les formations à l'université, en favorisant la personnalisation des parcours et en valorisant cette diversification. Il est aussi fondamental de la présenter dès l'école dans la formulation de la culture scientifique. Sans oublier la dernière étape de la formation universitaire, les thèses, qui pourraient être également plus longues afin d'augmenter la qualité du travail au travers d'expériences d'immersion et d'une maîtrise plus aboutie de l'interdisciplinarité, du dialogue avec la société et de l'apport de la recherche académique.

Les scientifiques ont aussi un rôle important à jouer dans la transmission des savoirs vers les politiques et le grand public. Il existe des liens étroits notamment avec les gestionnaires d'espaces protégés, mais les relations à d'autres niveaux de décision sont encore peu développées, ce qui constitue un frein à la transmission des connaissances les plus récentes et à la co-construction de nouveaux projets de recherche à la frontière entre enjeux socio-environnementaux et besoins de connaissances fondamentales. Des solutions doivent être mises en place pour améliorer le dialogue et la communication de nos travaux vers les décideurs. Les difficultés de dialogue restent encore trop liées à des problèmes structurels, caractérisant la relation entre le monde académique et les organismes de gestion et de décision. Un système de médiation entre les scientifiques et les gestionnaires et/ou décideurs pourrait être une des solutions permettant de faciliter le dialogue. Il serait également pertinent de réfléchir à des outils et des pratiques de travail permettant de faire le pont entre la nécessité de gestion et le besoin de recherche.



Les sciences du passé doivent permettre de promouvoir auprès des politiques et du grand public la notion de changements à toutes les échelles de temps et de former à la maîtrise des échelles temporelles. Par exemple, elles nourrissent les réflexions sur les impacts ou plutôt sur les effets de certains forçages sur les écosystèmes à différentes échelles temporelles, et permettent de proposer des approches moins binaires des changements, avec notamment l'intégration des notions de trajectoire et interactions. Il est aussi

important de ne pas négliger les incertitudes dans notre perception de l'environnement. Les médias constituent un moyen efficace de transmission des connaissances acquises par les sciences du passé à travers de projets coconstruits avec les scientifiques. Ils sont également un moyen d'intervenir dans le débat public pour informer et promouvoir les approches « paléo » afin de juger des choix et stratégies d'aménagement du territoire, des choix énergétiques, des risques et enjeux patrimoniaux et environnementaux.

## Conclusion

Un écosystème, ou une société et son environnement, pour lequel les temporalités multiples ne sont pas prises en compte, de même que leur trajectoire à toutes les échelles de temps et d'espace, entraînera une incapacité à faire face aux perturbations récurrentes et ou épisodiques, de faible et/ou forte intensité. Les recherches sur le passé représentent donc un héritage précieux, capable de nourrir notre besoin de projection et mener à bien des politiques d'anticipation. Parmi les diverses crises actuellement traversées par nos sociétés et écosystèmes (climatique, écologique, sanitaire...), toutes sont d'ordre scientifique : elles alertent les chercheurs sur leur méconnaissance des systèmes, des processus passés et en cours. Le rôle fondamental des sciences du passé réside donc dans la compréhension des trajectoires de ces derniers au cours du temps. Il paraît alors indispensable, afin de comprendre le fonctionnement des éco- et anthroposystèmes, de s'affranchir d'une vision extemporanée de nos enjeux actuels qui pourrait nous enfermer dans une approche utilitariste du vivant. Pour ce faire, l'accumulation et la mise en relation des données à différentes échelles (dans le temps mais également à un niveau international),

le maintien d'une diversité des spécialisations et l'interdisciplinarité, représentent des facteurs primordiaux. Favoriser la diversité des recherches/disciplines/spécialités nécessite cependant des moyens financiers et dépend de prises de décisions qui ne sont pas toujours du ressort des scientifiques. Les décisions scientifiques et politiques sont indissociables, mais nécessitent un degré de communication entre elles, car celles-ci ne se conçoivent pas sur la même échelle de temps. Le rôle du chercheur dans la société, acteur d'une science ouverte et écologique, doit être repensé, en offrant plus de temps (thèse rallongée à 4 ans, financement pluriannuel...) et de motivation (appels à projet dédiés) à l'exploration, l'archivage, la transmission et la communication du passé de la Terre, des écosystèmes et des sociétés. Il s'agit de n'oublier aucun écosystème, qu'il soit froid ou chaud, sec ou humide, proche ou lointain, passé ou présent. Les temporalités des dynamiques environnementales naturelles ou induites par les activités anthropiques peuvent, en revanche, servir de colonne vertébrale à la priorisation des actions de recherche. Ensemble, ces facteurs sont proposés comme profitables à l'établissement de priorités de recherche.

## RÉFÉRENCES

- Alsos, I.G., Rijal, D.P., Ehrich, D., Karger, D.N., Yoccoz, N.G., Heintzman, P.D., Brown, A.G., Lammers, Y., Pellissier, L., Alm, T., Bråthen, K.A., Coissac, E., Merkel, M.K.F., Alberti, A., Denoed, F., Bakke, J., PhyloNorway Consortium. (2022). Postglacial species arrival and diversity buildup of northern ecosystems took millennia. *Sci. Adv.* 8, eabo7434. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo7434>
- Bajard, M., Etienne, D., Quinsac, S., Dambrine, E., Sabatier, P., Frossard, V., Gaillard, J., Develle, A.-L., Poulenard, J., Arnaud, F., Dorioz, J.-M. (2018). Legacy of early anthropogenic effects on recent lake eutrophication (Lake Bénit, northern French Alps). *Anthropocene* 24, 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.11.005>
- Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Develle, A.-L., Giguët-Covex, C., Jacob, J., Crouzet, C., David, F., Pignol, C., Arnaud, F. (2017). Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene. *CATENA* 150, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.001>
- Battarbee, R.W., John Anderson, N., Jeppesen, E., Leavitt, P.R., 2005. Combining palaeolimnological and limnological approaches in assessing lake ecosystem response to nutrient reduction. *Freshwater Biology* 50, 1772–1780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01427.x>
- Becerra-Valdivia, L., Higham, T. (2020). The timing and effect of the earliest human arrivals in North America. *Nature* 584, 93–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2491-6>
- Bennion, H., Battarbee, R.W., Sayer, C.D., Simpson, G.L., Davidson, T.A. (2011). Defining reference conditions and restoration targets for lake ecosystems using palaeolimnology: a synthesis. *Journal of Paleolimnology* 45, 533–544. <https://doi.org/10.1007/s10933-010-9419-3>
- Birck, C., Epailard, I., Leccia, M.-F., Morand, A., Miao, C., Bertrand, C., Cavalli, L., Jacquet, S., Moulllec, P., Bonnet, R., Sagot, C., Franquet, E., Nellier, Y.M., Perga, M.E., Cottin, N., Pignol, C., Malet, E., Naffrechoux, E., Giguët-Covex, C., Jouffroy-Bapicot, I., Etienne, D., Millet, L., Sabatier, P., Wilhelm, B., Perren, B., Arnaud, F. (2014). Sentinel lakes: a network for the study and management of mountain lakes in the French Alps and in Corsica. *ecomont* 5, 63–69. <https://doi.org/10.1553/eco.mont-5-1s63>
- Braje, T.J., Dillehay, T.D., Erlandson, J.M., Klein, R.G., Rick, T.C. (2017). Finding the first Americans. *Science* 358, 592–594. <https://doi.org/10.1126/science.aao5473>
- Castañeda, I.S., Multiza, S., Schefuß, E., Lopes dos Santos, R.A., Sinninghe Damsté, J.S., Schouten, S. (2009). Wet phases in the Sahara/Sahel region and human migration patterns in North Africa. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 20159–20163.
- Colombaroli, D., Whitlock, C., Tinner, W., Conedera, M. (2017). Paleo records as a guide for ecosystem management and biodiversity conservation. *PAGES Magazine* 25, 2, 78-79. <https://doi.org/10.22498/pages.25.2.78>
- Connor, S.E., Araújo, J., Boski, T., Gomes, A., Gomes, S.D., Leira, M., Freitas, M.C., Andrade, C., Morales-Molino, C., Franco-Múgica, F., Akindola, R.B., Vannière, B. (2021). Drought, fire and grazing precursors to large-scale pine forest decline. *Diversity and Distributions* 27, 7, 1138-1151 <https://doi.org/10.1111/ddi.13261>
- Crucifix, M., de vernal, A., Franzke, C., von Gunten, L. (2017). Centennial to Millennial Climate Variability 25, 3, 131-166. <https://doi.org/10.22498/pages.25.3>
- Dearing, J., Acma, B., Bub, S., Chambers, F., Chen, X., Cooper, J., Crook, D., Dong, X., Dotterweich, M., Edwards, M., Foster, T., Gaillard, M.-J., Galop, D., Gell, P., Gil, A., Jeffers, E., Jones, R., Anupama, K., Langdon, P., Marchant, R., Mazier, F., McLean, C., Nunes, L., Sukumar, R., Suryaprakash, I., Umer, M., Yang, X., Wang, R., Zhang, K. (2015). Social-ecological systems in the Anthropocene: The need for integrating social and biophysical records at regional scales. *The Anthropocene Review* 2, 220–246.
- Dearing, J.A. (2008). Landscape change and resilience theory: a palaeoenvironmental assessment from Yunnan, SW China. *The Holocene* 18, 117–127. <https://doi.org/10.1177/0959683607085601>
- Dearing, J.A., Braimoh, A.K., Reenberg, A., Turner, B.L., van der Leeuw, S. (2010). Complex Land Systems: the Need for Long Time Perspectives to Assess their Future. *Ecology and Society* 15. <https://doi.org/10.5751/ES-03645-150421>
- Dearing, J.A., Jones, R.T., Shen, J., Yang, X., Boyle, J.F., Foster, G.C., Crook, D.S., Elvin, M.J.D. (2008). Using multiple archives to understand past and present climate–human–environment interactions: the lake Erhai catchment, Yunnan Province, China. *J. Paleolimnol* 40, 3–31. <https://doi.org/10.1007/s10933-007-9182-2>
- Dearing, J.A., Yang, X., Dong, X., Zhang, E., Chen, X., Langdon, P.G., Zhang, K., Zhang, W., Dawson, T.P. (2012). Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the lower Yangtze basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, E1111–E1120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118263109>
- Dearing, J.A., Zhang, K., Cao, W., Dawson, T.P., McKay, D.A., Sillitoe, P., Treves, R., Yang, X. (2019). Who determines the trade-offs between agricultural production and environmental quality? An evolutionary perspective from rural eastern China. *International Journal of Agricultural Sustainability* 17, 347–366. <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1667141>
- Dubois, N., Saulnier-Talbot, É., Mills, K. et al. (2018). First human impacts and responses of aquatic systems: A review of palaeolimnological records from around the world. *The Anthropocene Review*, 5(1), 28–68. <https://doi.org/10.1177/2053019617740365>
- Feurdean, A., Vannière, B., Finsinger, W. et al. (2020). Fire risk modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in Eastern and Central Europe. *Biogeosciences* 17, 1213-1230. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1213-2020>
- Fischer, H., Meissner, K.J., Mix, A.C. et al. (2018). Palaeoclimate constraints on the impact of 2 °C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geoscience* 11, 474–485. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0146-0>
- Giguët-Covex, C., Bajard, M., Chen, W., Walsh, K.J., Rey, P.-J., Messager, E., Etienne, D., Sabatier, P., Ficaretola, F.G., Gielly, L., Blanchet, C., Guffond, C., Chiquet, P., Arnaud, F., Poulenard, J. (2023). Long-term trajectories of mountain agro-ecosystems in the North-Western Alps. *Reg Environ Change* 23, 58. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02030-5>
- Gillson, L., Gell, P., von Gunten, L. (2017). Sustaining Earth's Biodiversity. *PAGES Magazine* 25, 2, 76-130. <https://doi.org/10.22498/pages.25.2>
- Gillson, L., Marchand, R. (2014). From myopia to clarity: sharpening the focus of ecosystem management through the lens of palaeoecology. in *Ecology & Evolution* 29, 6, 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.03.010>
- Gillson, L., Whitlock, C., Gell, P., Prader, S., Tinner, W., Eggleston, S. (2022). Using Paleoeecology in Restoration Ecology. *PAGES Magazine* 30, 1, 64p. <https://doi.org/10.22498/pages.30.1>
- Goring, S., Dawson, A., Simpson, G.L., Ram, K., Graham, R.W., Grimm, E.C., Williams, J.W. (2015). neotoma: A Programmatic Interface to the Neotoma Paleocological Database. *Open Quaternary* 1. <https://doi.org/10.5334/oq.ab>
- Guillevic, F., Rossi, M., Develle, A.-L., Spadini, L., Martins, J.M.F., Arnaud, F., Poulenard, J. (2023). Pb dispersion pathways in mountain soils contaminated by ancient mining and smelting activities. *Applied Geochemistry* 150, 105556. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105556>
- Hebda, C.F.G., McLaren, D., Mackie, Q., Fedje, D., Pedersen, M.W., Willerslev, E., Brown, K.J., Hebda, R.J. (2022). Late Pleistocene palaeoenvironments and a possible glacial refugium on northern Vancouver Island, Canada: Evidence for the viability of early human settlement on the northwest coast of North America. *Quaternary Science Reviews* 279, 107388. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107388>

- Hoffmann, D.L., Rogerson, M., Spötl, C., Luetscher, M., Vance, D., Osborne, A.H., Fello, N.M., Moseley, G.E. (2016). Timing and causes of North African wet phases during the last glacial period and implications for modern human migration. *Sci Rep* 6, 36367. <https://doi.org/10.1038/srep36367>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P.Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jouffroy-Bapicot, I., Pedrotta, T., Debret, M., Field, S., Sulpizio, R., Zanchetta, G., Sabatier, P., Roberts, N., Tinner, W., Walsh, K., Vannièrè, B. (2021). Olive groves around the lake. A ten-thousand-year history of a Cretan landscape (Greece) reveals the dominant role of humans in making this Mediterranean ecosystem. *Quaternary Science Reviews* 267, 107072 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107072>
- Latorre, C., Wilmshurst, J.M., von Gunten, L. (2016). Climate change and cultural evolution. *PAGES Magazine* 24, 2, 53-84. <https://doi.org/10.22498/pages.24.2>
- Lestienne, M., Vannièrè, B., Curt, T., Jouffroy-Bapicot, I., Hély, C. (2022). Integrating past variability in climate-driven Mediterranean fire hazard assessments for 2020-2100. *Climatic Change* 170, 14. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03258-y>
- Liu, S., Kruse, S., Scherler, D., Ree, R.H., Zimmermann, H.H., Stoof-Leichsenring, K.R., Epp, L.S., Mischke, S., Hertzschuh, U. (2021). Sedimentary ancient DNA reveals a threat of warming-induced alpine habitat loss to Tibetan Plateau plant diversity. *Nat Commun* 12, 2995. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22986-4>
- Messerli, B., Grosjean, M., Hofer, T., Nu, L. (2000). From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary Science Reviews* 19, 1-5, 459-479. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00075-X)
- Mills, B.J.W., Krause, A.J., Scotese, C.R., Hill, D.J., Shields, G.A., Lenton, T.M. (2019). Modelling the long-term carbon cycle, atmospheric CO<sub>2</sub>, and Earth surface temperature from late Neoproterozoic to present day. *Gondwana Research* 67, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.12.001>
- Mottes, C., Sabatier, P., Evrard, O., Cottin, N., Arnaud, F., Comte, I., Piot, C., Lesueur-Jannoyer, M., Lichtfouse, E., Poulénard, J. (2022). Pesticide resurrection. *Environ Chem Lett* 20, 3357-3362. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01347-z>
- Pedersen, M.W., Ruter, A., Schweger, C., Friebe, H., Staff, R.A., Kjeldsen, K.K., Mendoza, M.L.Z., Beaudoin, A.B., Zutter, C., Larsen, N.K., Potter, B.A., Nielsen, R., Rainville, R.A., Orlando, L., Meltzer, D.J., Kjær, K.H., Willerslev, E. (2016). Postglacial viability and colonization in North America's ice-free corridor. *Nature* 537, 45-49. <https://doi.org/10.1038/nature19085>
- Power, M. J., Marlon, J., Ortiz, N. et al. (2008). Changes in fire regime since the Last Glacial Maximum : an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics*, 30, 887-907. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0334-x>
- Sabatier, P., Poulénard, J., Fanget, B., Reyss, J.-L., Develle, A.-L., Wilhelm, B., Ployon, E., Pignol, C., Naffrechoux, E., Dorioz, J.-M., Montuelle, B., Arnaud, F. (2014). Long-term relationships among pesticide applications, mobility, and soil erosion in a vineyard watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 15647-15652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411512111>
- Seddon, A.W.R., Mackay, A.W., Baker, A.G., Birks, H.J.B., Breman, E., Buck, C.E., Ellis, E.C., Froyd, C.A., Gill, J.L., Gillson, L., Johnson, E.A., Jones, V.J., Juggins, S., Macias-Fauria, M., Mills, K., Morris, J.L., Nogués-Bravo, D., Punyasena, S.W., Roland, T.P., Tanentzap, A.J., Willis, K.J., Aberhan, M., van Asperen, E.N., Austin, W.E.N., Battarbee, R.W., Bhagwat, S., Belanger, C.L., Bennett, K.D., Birks, H.H., Bronk Ramsey, C., Brooks, S.J., de Bruyn, M., Butler, P.G., Chambers, F.M., Clarke, S.J., Davies, A.L., Dearing, J.A., Ezard, T.H.G., Feurdean, A., Flower, R.J., Gell, P., Hausmann, S., Hogan, E.J., Hopkins, M.J., Jeffers, E.S., Korhola, A.A., Marchant, R., Kiefer, T., Lamentowicz, M., Larocque-Tobler, I., López-Merino, L., Liow, L.H., McGowan, S., Miller, J.H., Montoya, E., Morton, O., Nogué, S., Onoufriou, C., Boush, L.P., Rodríguez-Sánchez, F., Rose, N.L., Sayer, C.D., Shaw, H.E., Payne, R., Simpson, G., Sohar, K., Whitehouse, N.J., Williams, J.W., Witkowski, A. (2014). Looking forward through the past: identification of 50 priority research questions in palaeoecology. *Journal of Ecology* 102, 256-267. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12195>
- Spiecker, H. (2003). Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe—temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67, 55-65. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00188-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00188-3)
- Vannièrè, B., Blarquez, O., Rius, D., Doyen, E., Brucher, T., Colombaroli, D., Connor, S., Feurdean, A., Hickler, T., Lemmen, C., Leys, B., Massa, C., Olofsson, J. (2016). 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes. *Quaternary Science Reviews* 132, 206-212 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.012>
- Williams, J.W., Grimm, E.C., Blois, J.L., Charles, D.F., Davis, E.B., Goring, S.J., Graham, R.W., Smith, A.J., Anderson, M., Arroyo-Cabrales, J., Ashworth, A.C., Betancourt, J.L., Bills, B.W., Booth, R.K., Buckland, P., Curry, B.B., Giesecke, T., Jackson, S.T., Latorre, C., Nichols, J., Purdum, T., Roth, R.E., Stryker, M., Takahara, H. (2018). The Neotoma Paleocology Database, a multi-proxy, international, community-curated data resource. *Quat. res.* 89, 156-177. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.105>



# Micro & macroévolution :

## Comment l'une peut éclairer l'autre ?

Auteurs : Sylvain Glémin (ECOBIO), Jonathan Rolland (LEDB), Bert Van Bocxlaer (EEP)

Contributeurs : Hélène Morlon (IBENS), Pierre Barry (ISEM), Jean-Renaud Boisserie (PALEVOPRIM), Gisèle Bronner (LMGE), Thomas Broquet (ADMM), Abigail Cahill (Albion College), Anne Chenuil (IMBE), Julien Clavel (LEHNA), Vincent Debat (ISYEB), Marianne Elías (ISYEB), Carina F. Mugal (Uppsala University), Michael Fontaine (MIVEGEC), Pierre-Alexandre Gagnaire (ISEM), Camille Grohé (PALEVOPRIM), Laurent Guéguen (LBBE), Franck Guy (PALEVOPRIM), Jos Käfer (LBBE), Amaury Lambert (IBENS & CIRB), Nicolas Lartillot (LBBE), Arnaud Le Rouzic (EGCE), Hélène Leman (UMPA), Thomas Lenormand (CEFE), Emese Megléczy (IMBE), Agnès Mignot (ISEM), Patrik Nosil (CEFE), Laurent Pallas (PALEVOPRIM), Corinne Petit (LMGE), Ophélie Ronce (ISEM), Jeanne Tonnabel (ISEM)

### 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ **Mieux intégrer les patrons et processus aux échelles microévolutives et macroévolutives via une compréhension des processus biologiques à travers les échelles de temps**
- ▶ **Développer de nouveaux modèles et de nouvelles données standardisées ainsi que plus d'études sur la spéciation et l'extinction dans une perspective comparative**
- ▶ **Faire un lien entre les connaissances de plusieurs domaines, comme en paléontologie, en phylogénétique/phylogénomique et en évolution moléculaire afin de co-construire des savoirs interdisciplinaires**

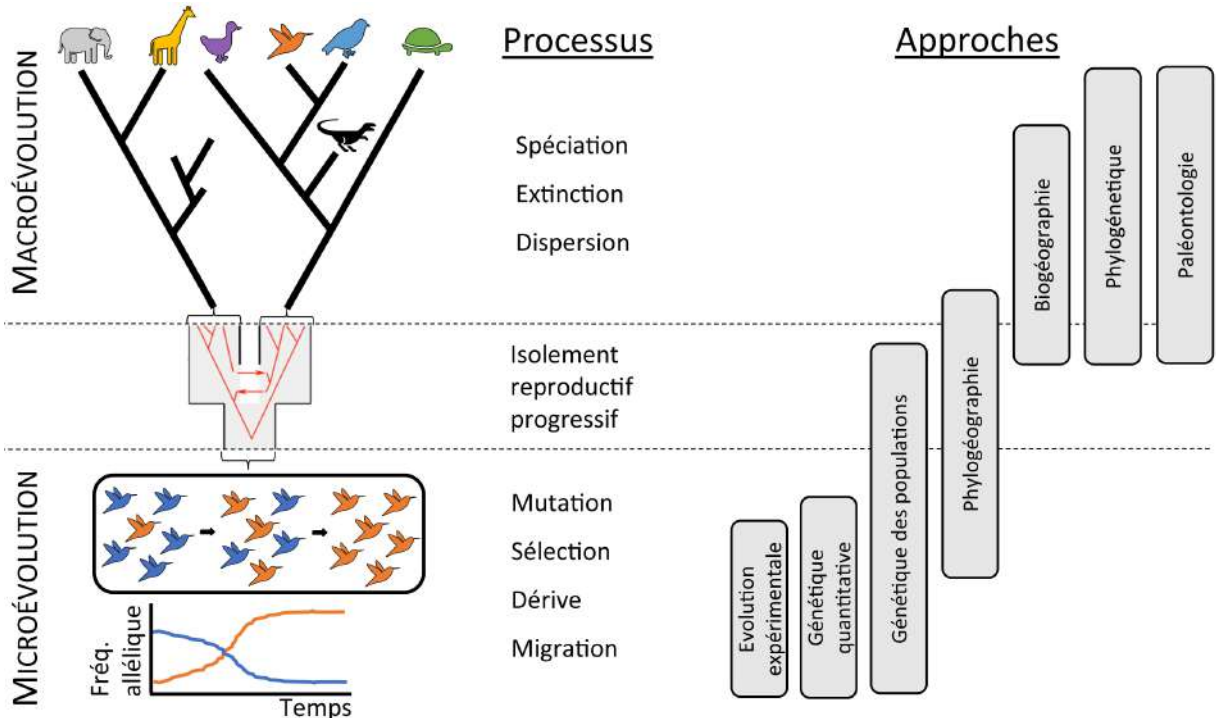
## Introduction

Depuis la théorie synthétique de l'évolution (Huxley, 1942), la biologie évolutive a souvent été séparée en deux niveaux d'étude complémentaires : micro-évolution et macro-évolution (Figure 1). La micro-évolution s'intéresse aux mécanismes évolutifs en dessous du niveau de l'espèce, en utilisant par exemple des approches de génétique des populations, génétique quantitative ou de phylogéographie (Hartl & Clark, 2006 ; Falconer & Mackay, 1989 ; Lynch & Walsh, 1998 ; Avise, 2000). Elle s'appuie souvent sur des analyses fines à partir de suivis de terrain, de larges échantillonnages intra-spécifiques et d'expérimentations, mais seulement sur une ou quelques espèces proches. Les méthodes utilisées en micro-évolution s'appuient, par exemple, sur des inférences à partir de patrons de variations des fréquences alléliques au sein et entre populations différentes, afin de comprendre l'histoire démographique et la différenciation des populations ainsi que les pressions sélectives en jeu, ou encore sur l'analyse plus

directe des phénotypes et facteurs affectants le *fitness*.

La macro-évolution s'intéresse, elle, à l'évolution et la diversification au niveau de l'espèce et au-dessus, afin de comprendre comment la biodiversité est organisée dans le temps et l'espace. Traditionnellement, la dynamique et les tendances évolutives à grande échelle sont étudiées par l'analyse du registre fossile (Simpson, 1944 ; Jepsen *et al.*, 1949 ; Stanley, 1979), mais elles peuvent aussi être étudiées à partir de méthodes comparatives appliquées à des phylogénies moléculaires reconstruites à partir d'espèces actuelles (Cooney *et al.*, 2017 ; Cantalapiedra *et al.*, 2017). Ce type d'étude s'appuie sur de larges bases de données sur un très grand nombre d'espèces actuelles et/ou fossiles, avec peu de détails concernant les mécanismes opérant au sein de chaque espèce. Ces méthodes comparatives visent à estimer soit les taux de spéciation et d'extinction, soit les taux d'évolution des traits des espèces reconstruits sur de larges phylogénies (mégaphylogénies), ou directement à partir du registre fossile.

Figure 1. Représentation schématique de la micro et la macro-évolution qui se déroulent à des échelles spatiales et temporelles différentes ainsi que les processus associés aux différents niveaux. Les approches et disciplines en biologie évolutive couvrent des échelles spatiales et temporelles différentes (local jusqu'au global ; écologique/générationnelle jusqu'à des millions de génération, donc dans le temps profond). La notion d'espèce et l'installation d'un isolement reproductif irréversible se trouve à la frontière entre la micro-évolution et macro-évolution. © Sylvain Glémin, Jonathan Rolland, Bert van Bocxlaer - CNRS





## État des lieux : diversité des conceptions et des approches

Une des difficultés pour lier la micro et la macroévolution est la grande variété des thématiques et des approches impliquées et des « cultures scientifiques » qui y correspondent. Les différences d'échelle d'étude et de type de données utilisées mènent aussi à des approches différentes et parfois divergentes. Cette diversité nécessite de définir un langage commun et un minimum de consensus sur les questions de recherches importantes.

### Des problèmes de définition

Le premier type de problème de terminologie découle directement de la distinction entre micro et macroévolution. Le concept d'« espèce » qui distingue ces deux niveaux (Figure 1) est un concept extrêmement débattu car il dépend des organismes étudiés (vertébrés, plantes, bactéries...). Nous souhaitons distinguer notre réflexion d'un débat sur la définition du concept d'« espèce » qui s'intéresse à l'assignation d'individus dans des groupes fixes, ou la description d'espèces cryptiques, nous proposons ici plutôt d'étudier les mécanismes et les trajectoires de l'évolution sur un *continuum* temporel englobant l'échelle individuelle, populationnelle et interspécifique.

Le second terme débattu est celui de « macroévolution » qui interpelle une partie des biologistes de l'évolution car il sous-entend que la sélection agit à différents niveaux. Ce débat est important car il doit permettre de discuter à quels niveaux d'organisation biologique (gènes, protéines, individus, populations, espèces) les différentes pressions de sélection agissent et quelles sont leurs conséquences sur la diversité actuelle. Nous pensons que ces questions doivent être discutées de manière interdisciplinaire entre paléontologues (*Gulliver Further's travel*, Gould, 1988), et néontologues (Lewontin, 1970 ; Fitzjohn, 2010). Il semble consensuel que la macroévolution est influencée par l'enchaînement de processus microévolutifs sur des temps longs. Cependant, ce qui est moins consensuel est de savoir s'il existe des propriétés émergentes à la macroévolution (Kinnison & Hendry, 2001 ; Hautmann, 2020, voir « Une compréhension des processus biologiques à travers les échelles de temps »).

### Une influence des modèles biologiques

Au-delà des problèmes de définitions, la façon d'aborder le lien entre micro et macroévolution et les questions qui y sont associées dépendent de la communauté scientifique à laquelle on appartient et des modèles biologiques étudiés. En particulier, l'importance de l'hybridation et des échanges horizontaux, qui varie en fonction des groupes d'organismes, donne un cadre assez différent aux limites et aux interactions entre micro et macroévolution. Les transferts horizontaux, entre des espèces parfois très éloignées, jouent un rôle central chez les bactéries et les archées, ce qui complexifie la reconstruction de l'évolution sur des temps longs, mais qui rend aussi plus floue la limite entre processus micro et macroévolutifs. Chez les eucaryotes, le rôle de l'hybridation, en particulier (mais pas seulement) associé à la polyploidie, est reconnu depuis longtemps chez les plantes comme un processus important jouant un rôle aux deux échelles (Stebbins, 1940 ; Anderson & Stebbins, 1954). Il a été moins mis en avant chez les animaux, en particulier chez les vertébrés (Dowling & Secor, 1997), même si des études génomiques suggèrent un rôle important de l'hybridation dans la spéciation aussi chez les animaux (Mallet, 2007). La présence ou non de fossiles modifie aussi les questions posées et les approches : par exemple les questions sur l'ubiquité de la stase évolutive et les variations de taux d'évolution ont émergé, au moins au départ, de confrontations entre données fossiles et actuelles.

### Un difficile consensus

Un premier point concerne la difficulté à amorcer une discussion tant les communautés de chercheurs qui travaillent sur des échelles différentes ont un jargon différent, une vision différente des processus dominants et donc des questions jugées importantes. Nous en faisons ici une description un peu caricaturale et stéréotypée pour illustrer que nous sommes encore assez loin d'une synthèse qui ferait consensus au sein de l'ensemble des communautés.

Certains chercheurs qui travaillent sur des populations actuelles, souvent en génétique des populations, questionnent l'existence d'un niveau macroévolutif qui nécessiterait des explications au-delà de la théorie microévolutive. Cette position résulte probablement d'une base théorique bien définie en génétique des populations et de l'impression que cette théorie est largement applicable au monde naturel. Ceux qui mènent des études écologiques dans les écosystèmes actuels se concentrent davantage sur les interactions entre les populations et les espèces et l'interaction entre les facteurs biotiques et abiotiques. À des échelles temporelles courtes, il semble possible de faire des prédictions, car ces prédictions reposent principalement sur la contingence des écosystèmes actuellement en place, c'est-à-dire que les valeurs des variables d'aujourd'hui sont en général une bonne base pour les valeurs de demain. Ils offrent donc des réponses partielles qui peuvent sembler satisfaisantes aujourd'hui, mais qui offrent de faibles perspectives d'extrapolation à plus large échelle.

Ceux qui effectuent des analyses phylogénétiques comparatives connaissent actuellement une vaste expansion de leur domaine, avec une variété de nouveaux modèles et d'approches, dont l'inclusion de données fossiles dans les analyses. Comme ce domaine est en plein développement, il n'y a pas encore de consensus sur les modèles qui représentent le mieux les dynamiques macroévolutives, et une synthèse plus large doit encore être développée. Dans ce domaine, il ressort que lier micro et macroévolution est une question importante et pour certains chercheurs, la microévolution peut apparaître insuffisante pour expliquer complètement la macroévolution, car des résultats hétérogènes ou contre-intuitifs sont régulièrement obtenus. Ceux qui sont convaincus que la macroévolution peut être complètement expliquée à partir de la microévolution regrettent cependant que la théorie actuelle ne fournisse pas (ou très peu) de prédictions sur les dynamiques macroévolutives, ou sur les paramètres clés de la macroévolution,

tels que taux de spéciation, taux d'extinction et vitesse d'évolution des phénotypes. Ce sont pourtant ces dynamiques et ces paramètres qui donnent le contexte historique de la biodiversité actuelle et peuvent informer sur les processus microévolutifs.

Finalement, les paléontologues et paléobiologistes, qui travaillent sur des échelles de temps longs, suggèrent qu'il existe une déconnexion entre les niveaux microévolutifs et macroévolutifs, liée au fait que les données dont on dispose sont souvent fragmentaires et qu'il est notamment difficile de caractériser des populations en paléobiologie (ex. facteurs de taphonomie, *time-averaging*...). Les possibilités de faire un lien se retrouvent donc limitées. Ils sont aussi souvent confrontés à des résultats qu'on ne peut pas expliquer directement à partir du niveau microévolutif. Par exemple, comment pourrait-on comprendre les grandes transitions dans l'évolution de la vie paléozoïque à partir des modèles microévolutifs ? De ce fait, certains chercheurs sont convaincus qu'il existe des processus observables au niveau macroévolutif.

Une des clefs d'un dialogue constructif est sans doute de commencer à travailler sur des indices et des objets observables et mesurables dans les différentes disciplines et qui ne sont ni dépendants du type d'organisme étudié, ni de l'échelle de temps. Un bon exemple est l'utilisation des taux d'évolution, mesurables à différentes échelles de temps, qui ont permis de mettre en évidence les différences de taux d'évolution phénotypique aux différentes échelles avec des données paléontologiques et moléculaires (Uyeda *et al.*, 2011 ; Harmon *et al.*, 2021). Les données génomiques sont un autre exemple d'objet qui peut être comparé entre organismes appartenant à des clades très divergents. Elles permettent d'étudier les processus évolutifs à l'échelle populationnelle sur de courtes échelles de temps (jusqu'à l'étude d'une seule génération) (Egan *et al.*, 2015), à l'échelle de clades entiers sur des millions d'années voire à l'échelle de l'ensemble du vivant.

## Questions de recherche futures : nouveaux modèles et nouvelles approches pour une meilleure intégration des échelles et des processus

À partir de cet état des lieux, peut-on faire émerger une vision plus intégrée des processus évolutifs pour une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la création des patrons de biodiversité ? Le défi est à la fois conceptuel et pratique.

### Une compréhension des processus biologiques à travers les échelles de temps

Bien que cela soit encore débattu, les processus macroévolutifs de spéciation, d'extinction, et d'évolution des traits des espèces, devraient reposer sur des mécanismes microévolutifs à l'échelle populationnelle, à la fois génétique et démographique, dans un contexte environnemental et écologique donné : dynamique de l'adaptation, isolement reproducteur, dispersion, expansion ou réduction des populations, coexistence ou exclusion d'espèces.

Cependant, malgré cette unité de mécanismes, il existe toute une littérature qui démontre une déconnexion entre les patterns observés aux échelles micro et macroévolutives, (Gould & Eldredge, 1977 ; Ho *et al.*, 2005 ; Uyeda *et al.*, 2011 ; Henao Diaz *et al.*, 2019 ; Hansen & Martin, 1996 ; Reznick & Ricklefs, 2009). Un premier exemple concerne le phénomène des taux d'évolution faibles sur de longues périodes de temps et rapides sur des périodes courtes, communément appelé le « paradoxe de stase » (Estes & Arnold, 2007 ; Harmon *et al.*, 2021). Un deuxième exemple concerne la déconnexion apparente entre des facteurs mesurés à l'échelle populationnelle comme la vitesse à laquelle deux populations peuvent se différencier génétiquement et les taux de spéciation (Harvey *et al.*, 2017 ; Singhal *et al.*, 2022), ou encore la déconnexion entre les vitesses d'acquisition de l'isolement reproducteur et les taux de spéciation (Freeman *et al.*, 2022 ; Rabosky *et al.*, 2013). Ces déconnexions peuvent avoir des causes statistiques mais aussi biologiques (Harmon *et al.*, 2021). Par exemple, le fait que les taux d'évolution morphologiques soient plus faibles sur des périodes de temps longues a été principalement expliqué par la sélection stabilisante ou fluctuante autour d'un optimum. Comme proposé dans la littérature paléontologique, notamment avec le modèle des équilibres ponctués, l'évolu-

tion pourrait suivre des périodes d'accélération (ponctuations ou « sauts ») et des périodes où les taux d'évolution sont plus faibles (stases ; Gould & Eldredge, 1977 ; Uyeda *et al.*, 2011). Nosil *et al.* (2021) avancent que les systèmes évolutifs sont des systèmes globalement résilients, résistants aux perturbations, impliquant des périodes de relative stabilité en alternance avec des périodes de ruptures qui correspondent à une incapacité à limiter les perturbations. Ces ruptures pourraient être causées par des facteurs externes ou des boucles de rétroactions qui entraîneraient le système loin d'un état stable.

Il a aussi été proposé qu'il existait des propriétés émergentes au niveau de l'espèce ne pouvant pas être simplement expliquées par la somme des processus microévolutifs, comme, par exemple, l'aire de la distribution géographique et le niveau de connectivité entre populations, ou encore la structure ontogénétique au sein de l'espèce (Jablonski, 2008). Ces traits sont caractéristiques d'espèces et participent à des interactions entre individus d'espèces différentes (ex. prédateur/proie). Ces traits peuvent donc influencer la capacité à créer des lignées nouvelles ainsi que la probabilité d'extinction, avec des mécanismes associés pouvant être distincts de ceux ayant conduit à l'évolution de ces traits (Dynesius & Jansson, 2014).

Mieux comprendre comment se produisent ces changements de dynamique en fonction des échelles de temps et quels en sont les mécanismes sous-jacents semble donc une étape difficile mais centrale pour une meilleure intégration des processus micro et macroévolutifs. Cela demande en particulier de développer de nouveaux modèles permettant d'intégrer ou de faire émerger ces différentes échelles temporelles.

## De nouveaux modèles à développer

Les prochaines années devraient voir pléthore de nouveaux modèles et de nouvelles méthodes comparatives se développer à la frontière entre micro et macroévolution. Nous pouvons distinguer différents types de modèles : des modèles individus-centrés et populationnels qu'on cherchera à étendre sur des temps longs, ou des méthodes comparatives intégrant les détails de l'évolution au niveau individuel et populationnel. Il apparaît nécessaire de travailler à la fois sur l'analyse de modèles conceptuels, permettant de mieux comprendre les processus, et sur des modèles statistiques associés permettant de confronter ces modèles aux données.

### Des modèles microévolutifs pouvant prédire des patterns macroévolutifs

Un certain nombre d'outils pour modéliser l'évolution des espèces à la marge entre micro et macroévolution existent déjà. C'est en particulier le cas des modèles de coalescence multi-espèces (Sukumaran & Knowles, 2017). Ces approches permettent de reconstruire l'histoire des populations et des espèces en utilisant un même cadre conceptuel et statistique. Cependant, ils ne permettent pas de déterminer les mécanismes sous-jacents ni de faire émerger directement les patrons macroévolutifs à partir des dynamiques microévolutives. Typiquement, les arbres de gènes issus des processus de coalescence sont emboîtés dans les arbres d'espèces qui leur sont imposés et qui sont supposés exister indépendamment de la dynamique infra-spécifique. Une approche prometteuse est de développer des modèles de type coalescence qui feraient émerger l'arbre des espèces en prenant en compte la mise en place de barrières reproductives. Une approche intéressante a déjà été proposée dans ce sens en introduisant une vision multilocus au coalescent multi-espèces (Marin *et al.*, 2020). Dans un tel modèle, les généalogies des différents gènes d'un génome ne sont plus contraintes par l'arbre des espèces mais l'arbre des espèces émerge en fonction de la concordance entre les généalogies des différents gènes.

Plus généralement, l'extension de modèles microévolutifs (de type individus-centrés) sur de longues échelles de temps et d'espace permet

de générer, au moins d'un point de vue théorique, des changements d'échelle pouvant faire émerger de nouvelles propriétés, faisant ainsi le lien entre micro et macroévolution. Un exemple simpliste mais illustratif est que la dynamique de fixation d'un allèle dans une population (échelle de génétique des populations) peut s'interpréter comme un processus ponctuel de substitution sur des temps longs (échelle phylogénétique). Ces approches de changement d'échelle peuvent s'appuyer sur un ensemble d'outils probabilistes déjà connus. Cependant, ces techniques de séparation des échelles de temps pourraient être insuffisantes pour capturer l'ensemble du processus et il est possible que des processus opèrent à une échelle de temps intermédiaire, ce qui nécessiterait d'être étudié afin de développer une vision unifiée.

Au-delà des outils mathématiques permettant de modéliser correctement ces changements d'échelle, nous pouvons nous poser la question de la portée et de l'objectif de ces modèles. Au cours de l'histoire du vivant, ces changements d'échelle peuvent se manifester par des « grandes transitions », comme les extinctions de masse, qui impliquent des périodes de rupture de stabilité, ou l'adaptation et la colonisation de nouveaux écosystèmes comme les écosystèmes terrestres à partir des milieux marins. Par exemple, l'évolution des eucaryotes n'arrive qu'une fois et implique de nombreux bouleversements (méiose, diploïdie, modes de régulation complexes, multicellularité). Est-il possible de construire des modèles microévolutifs rendant compte de changements majeurs ? Comment proposer des modèles alternatifs là où des phénomènes neutres ou maladaptatifs peuvent émerger, mais ne sont pas pré-supposés a priori faute d'explications alternatives (Lynch, 2007) ? Une piste de recherche possible est de développer des modèles microévolutifs beaucoup plus ambitieux et plus complexes, par exemple en termes de nombre de traits pouvant évoluer, de lien plus explicite entre génotype et phénotype (par exemple via les réseaux de régulation des gènes), de prise en compte de la structure des génomes (recombinaison, distribution des gènes, variations structurales), d'interactions écologiques ou d'échelle de temps. Dans ces modèles, nous devons faire face à de nouveaux enjeux liés à la complexité, tels que

l'augmentation du nombre de paramètres, les temps de calcul et la difficulté à identifier les modèles, un grand nombre de scénarios pouvant devenir équiprobables.

### **Des modèles d'inférence intégrant les différentes échelles**

De nouveaux modèles d'inférence sont aussi nécessaires à la fois pour intégrer les informations des différentes échelles et pour mieux prédire les changements de régimes et les événements rares pouvant correspondre aux différentes propriétés émergentes discutées plus haut.

Plusieurs approches de modélisation ont été proposées afin d'intégrer des données intraspécifiques dans le cadre de méthodes comparatives. Typiquement, les données moléculaires se prêtent bien à ces approches du fait de leur équivalence à tous les niveaux. Par exemple, la variation intraspécifique peut être prise en compte dans des modèles d'évolution de traits, le long des phylogénies, comme proposé pour l'évolution de l'expression des gènes (Rohlf et al., 2014). Pour aller plus loin, l'intégration dans un même cadre statistique des approches de génétique des populations et de phylogénie

permet d'inférer l'évolution de paramètres populationnels, comme la taille efficace, sur des échelles macroévolutive (Latrille et al., 2021). Ce type de modèle, encore relativement simple, devrait se développer dans les prochaines années afin d'intégrer plus systématiquement les différentes échelles et de permettre de « propager » les mécanismes populationnels le long des phylogénies.

En plus d'intégrer le niveau populationnel, il est aussi nécessaire de permettre une plus grande souplesse et diversité dans les modèles macroévolutifs afin de prendre en compte les changements de dynamique sur de longs pas de temps, par exemple, en incluant à la fois des possibilités de saut dans les taux d'évolution (processus de Levy, Landis & Schraiber, 2017) et une variation de la volatilité (intensité des changements stochastiques). Cela permet de mieux rendre compte des changements de régimes qui peuvent être observés par exemple dans des séries paléontologiques, comme les alternances de stase avec des ponctuations évolutives. Un des défis qui reste est d'expliquer ces changements de dynamiques par des mécanismes microévolutifs ou par des forçages écologiques externes et de les incorporer dans ces modèles.

### **Utiliser les patterns et processus macroévolutifs pour informer les processus microévolutifs**

À l'échelle microévolutive, la génétique des populations et la génétique quantitative constituent le corpus théorique qui permet de prédire l'évolution des populations, en connaissant les pressions de sélection qui agissent sur elles. Cependant, elles ne prédisent pas quelles sont ces pressions de sélection ni le contexte dans lequel elles s'exercent. Elles prédisent donc très bien l'évolution des fréquences alléliques et des phénotypes connaissant les coefficients et les gradients de sélection, mais ne permettent pas de prédire la forme générale du paysage adaptatif et son évolution au cours du temps.

Les approches macroévolutive peuvent, de leur côté, fournir des informations précieuses sur le contexte sélectif, par exemple en identifiant des patterns répétés de convergence moléculaire ou

morphologique à grande échelle, en identifiant des redondances dans l'évolution des espèces ou des associations entre traits ou entre traits et contexte écologique. Elles permettent aussi d'identifier des « innovations clefs » qui peuvent induire des changements drastiques des paysages sélectifs, comme dans les radiations adaptatives.

#### **Patterns macroévolutifs et paysages de fitness : information sur les contraintes et forçages environnementaux.**

La sélection agit vraisemblablement à des niveaux hiérarchiques différents. Une des représentations de cette sélection est le paysage de fitness qui peut être représenté au niveau individuel, populationnel et spécifique. La forme de ce paysage de

*fitness* est suggérée comme étant un des facteurs principaux qui fait évoluer des traits dans certaines directions et qui pourrait expliquer que l'évolution se stabilise dans des zones adaptatives. Il a déjà été proposé que ce concept de paysage de *fitness* puisse constituer un pont conceptuel majeur entre micro et macroévolution (Arnold *et al.*, 2001). Il est donc capital de caractériser ce paysage de *fitness* et de comprendre sa dynamique de changement au cours du temps afin de prédire les trajectoires évolutives des espèces qui se situent dans ce paysage.

Il existe des modèles pour reconstruire ces paysages de *fitness* à petite échelle à l'aide de méthodes expérimentales (ex. gradients de sélection multivariés, test systématique de série de mutants). Cependant, comme la sélection fluctue au cours du temps (*seascape*, Mustonen & Lässig, 2009) et vraisemblablement aussi entre niveaux taxonomiques, l'échelle microévolutive est généralement insuffisante pour caractériser proprement les paysages de *fitness* au-delà des optimums locaux d'une population ou d'une espèce (Arnold *et al.*, 2001). L'échelle macroévolutive peut permettre une caractérisation plus générale de ces paysages de *fitness* via des méthodes comparatives (Uyeda & Harmon, 2014 ; Boucher *et al.*, 2018) et phylogénétiques (Rodrigues & Lartillot, 2017). Elles permettent, par exemple, d'étudier les domaines de stabilité pour l'évolution des traits morphologiques, ou moléculaires, afin de comprendre quels sont les valeurs de traits « impossibles », qui n'ont jamais vu le jour au cours des temps évolutifs longs, et inversement les transitions probables, qui sont vus relativement fréquemment dans un grand nombre de clades. De plus, il est en théorie possible de prendre aussi en compte comment ces paysages de *fitness* peuvent être affectés par le contexte écologique. La perte d'un prédateur dans un niveau trophique peut considérablement modifier le paysage de *fitness* de tous les niveaux trophiques inférieurs. De ce point de vue, la plasticité phénotypique pourrait influencer le potentiel d'une espèce de traverser des vallées de *fitness* et peut donc avoir une importance macro-évolutive.

Il est encore difficile de comprendre le lien entre les différents paysages de *fitness* aux différentes échelles. D'un point de vue théorique, un paysage de *fitness* changeant (*seascape*,

Mustonen & Lässig, 2009) pourrait permettre de capturer dans un seul cadre conceptuel les paysages locaux de court terme et plus généraux sur le long terme, mais au prix d'une complexité accrue. D'un point de vue empirique, il est encore difficile d'établir un lien direct entre des paysages estimés aux deux échelles, par exemple entre la caractérisation d'optimums phénotypiques par des méthodes de gradients de sélection (Arnold & Lande, 1983) ou par des méthodes phylogénétiques (Uyeda & Harmon, 2014), en particulier car les premiers correspondent à des paysages statiques à un temps donné, alors que les seconds correspondent à une intégration sur un temps plus ou moins long de paysages fluctuant.

#### **Patterns macroévolutifs pour tester les processus microévolutifs**

Avec le développement des méthodes comparatives, les patrons macroévolutifs ont été utilisés pour tester des processus microévolutifs. Typiquement, tester des hypothèses évolutives nécessite des comparaisons et donc suffisamment de variation des facteurs d'intérêts. Si cette variation n'est pas suffisante au sein d'une espèce, ou ne peut pas être obtenue de façon expérimentale, le recours aux comparaisons interspécifiques est une alternative classiquement utilisée. Pour aller au-delà des simples corrélations, les méthodes de « *path analysis* » ont déjà été étendues aux analyses phylogénétiques (Hardenberg & Gonzalez, 2013).

Certaines théories ne peuvent qu'être difficilement testées sans approches macroévolutives, par exemple si elles prédisent un processus cumulatif sur le temps long, une directionnalité dans l'évolution, ou si elles prédisent des effets sur les processus de spéciation ou d'extinction. L'évolution de l'autofécondation constitue un bon exemple. L'analyse des mécanismes microévolutifs conduit à plusieurs prédictions comme le fait que les transitions de l'allofécondation vers l'autofécondation devraient être principalement unidirectionnelles, alors que la limitation des flux de gènes devrait favoriser l'isolement reproducteur, et que l'accumulation de fardeau génétique et la perte de diversité génétique devraient conduire à des taux d'extinction plus forts. Ces prédictions sont difficilement testables à l'échelle microévolutive alors qu'elles



peuvent l'être, conjointement, grâce à des approches macroévolutives basées sur de grandes phylogénies (Goldberg *et al.*, 2010).

Ces différentes méthodes macroévolutives sont en plein essor. Si elles ont été initialement conçues pour analyser des patrons macroévolu-

tifs, une direction souhaitable serait d'articuler plus directement ces méthodes avec les mécanismes microévolutifs sous-jacents, ainsi que d'orienter les études macroévolutives vers des approches plus fortement orientées vers les tests d'hypothèses (Uyeda *et al.*, 2018).

### **Étude de la spéciation dans une perspective comparative : un lien entre micro et macroévolution**

Dans les points discutés précédemment, la question du changement d'échelle a été mise en avant. Le contexte de la spéciation est typiquement celui au niveau duquel peut s'analyser ce changement d'échelle. Dans certains cas, comme celui des cichlidés, l'isolement reproducteur évolue à des échelles de temps comparables aux dynamiques de populations, aboutissant à des taux de spéciation extrêmement élevés. À l'opposé, dans d'autres cas, la spéciation peut prendre plusieurs millions d'années avec des événements d'hybridation pouvant encore se produire sur de longues échelles de temps (Barley *et al.*, 2022). Plus généralement, il a été proposé que les différents mécanismes conduisant à la spéciation se mettaient en place dans une certaine gamme de divergence appelée la « zone grise » (Roux *et al.*, 2016). Des études détaillées de cette zone grise dans un

cadre comparatif, au sein d'un même clade et/ou dans un même contexte écologique, ouvrent la voie à une compréhension approfondie de la spéciation. Ce type d'approche se développe car il devient possible d'étudier la dynamique de la spéciation et de la divergence entre espèces non plus pour des paires d'espèces mais pour des complexes d'espèces, voire à l'échelle de clades entiers. De plus, il devient possible de prendre en compte conjointement des données génomiques, des traits d'histoire de vie, la diversité des systèmes reproductifs et des caractéristiques écologiques des espèces. Le développement de ces études de mécanismes microévolutifs dans un cadre comparatif macroévolutif pourra en retour nourrir des modèles cherchant à prédire les dynamiques de diversifications à partir des mécanismes génétiques et écologiques au sein des populations (Aguilée *et al.*, 2018).

### **La difficile question de l'extinction**

Nous savons que la diversité des espèces actuelles ne représente qu'une petite fraction (<1%) des lignées ayant existé sur Terre (Simpson, 1944). Lier macro et microévolution nécessitera de comprendre comment la diversité a évolué au cours du temps et donc, de bien comprendre le processus d'extinction qui est un phénomène agissant au niveau des espèces ou des taxons de rang supérieur (le risque d'extinction à un moment donné pour une lignée évolutive peut être considéré comme un trait de l'espèce, *i.e.* vulnérabilité). Le processus d'extinction peut être influencé par les tailles efficaces des populations au sein de l'espèce concernée et par la connectivité des populations (facteurs internes), mais aussi par des facteurs biotiques externes (comme la prédation ou la compétition) et abiotiques, qui interagissent dans l'espace et dans le temps

(McKinney, 1997 ; Peters, 2008 ; Benton, 2009 ; Dynesius & Jansson, 2014).

L'extinction est souvent estimée à partir de données fossiles, par compilation des occurrences des lignées évolutives dans le temps, ou indirectement, et avec de nombreuses limites, par des analyses phylogénétiques (Purvis, 2008 ; Peters, 2008 ; Bell & Gonzalez, 2009 ; Raboski, 2010). L'estimation de l'extinction est souvent biaisée car les fossiles anciens sont souvent moins bien préservés que les fossiles récents, et il est difficile de les attribuer avec certitude à des clades. Comme la spéciation, l'extinction est souvent estimée comme un processus instantané dans les méthodes comparatives, les modèles de diversification pourraient être améliorés dans les prochaines années en prenant en compte les variations de taille de populations et calculer des probabilités d'extinction au présent.

De manière plus générale, les développements technologiques et méthodologiques nous permettent de plus en plus de faire des analyses intégratives holistiques, c'est-à-dire en incluant des représentants modernes ainsi que des espèces éteintes. Ces approches permettent de comparer des analyses basées sur la diversité actuelle et sur la diversité totale estimée dans le passé, ce qui permet d'estimer plus précisément l'impact de l'extinction sur la dynamique de diversification. On peut distinguer l'extinction « de fond », des extinctions de masses. Le taux d'extinction « de fond » est généralement faible ou modéré et proche du taux de spéciation. Ces extinctions semblent être liées à des dynamiques prédictibles de la biologie des espèces et de leur microévolution (taille de populations,

trait d'histoire de vie), comme formulé par exemple par la théorie de la biogéographie des îles qui décrit une relation entre l'aire de distribution, le nombre d'espèces dans un écosystème en équilibre et le taux d'extinction (Valente *et al.*, 2020). Cependant, les taux d'extinctions varient aussi dans le temps ; les taux d'extinction de masse dépassent très largement les taux de spéciation et paraissent plus difficiles à prédire car ils sont souvent liés à des facteurs environnementaux externes (volcanisme, météorite... Scheffer *et al.*, 2001). Comprendre les liens entre les dynamiques d'extinction aux échelles micro- et macroévolutives semble crucial afin de pouvoir estimer et prédire l'impact des changements anthropiques et climatiques sur les écosystèmes d'aujourd'hui.

### Que peut-on espérer prédire ?

Au final, quelle serait l'utilité d'un lien entre la micro et la macroévolution au-delà de l'exercice intellectuel ? D'un point de vue pratique, comprendre le lien entre la micro et la macroévolution pourrait nous aider à utiliser les données passées pour prédire les changements des environnements dans un avenir proche et leur impact sur la biodiversité, ce qui est un enjeu primordial vu l'état actuel d'érosion de cette dernière. Pouvoir lier micro et macroévolution pourrait aussi nous aider à mieux comprendre les effets des modifications des écosystèmes et de l'exploitation des ressources naturelles par l'humain.

Une question majeure est donc de savoir si la macroévolution peut être prédictive. Peut-on obtenir des prédictions à l'échelle macroévolutive à partir de modèles microévolutifs ? Ces prédictions sont-elles cohérentes avec les patrons macroévolutifs observés ?... Une question parallèle est de savoir si l'évolution est ou non déterministe. Dans son œuvre « *Wonderful Life* », Gould (1990) a proposé l'expérience de pensée « *replaying the tape of life* » afin de savoir si, en partant d'un point donné dans le temps, l'évolution prendrait la même route que celle qu'elle a déjà prise. Il indiquait que cela serait impossible car la stochasticité joue un grand rôle dans l'évolution et cette vision est largement partagée par la communauté scientifique (Erwin, 2000 ; Benton, 2009).

Cependant, la macroévolution permet d'identifier des patterns répétés de convergence moléculaire

et morphologique à grande échelle et d'identifier des redondances dans l'évolution des espèces. On peut mesurer cette répétitivité et, dans le cas de paysages de *fitness* statiques, les trajectoires évolutives sont essentiellement non aléatoires. Cependant, ces paysages de *fitness* ne sont pas statiques, en particulier sur de longues échelles de temps. Les parts relatives de l'évolution déterministe et stochastique dépendent alors des conditions temporelles et écologiques spécifiques, qui déterminent les pressions sélectives, ainsi que de la variation génétique disponible (Lobkovsky & Koonin, 2012). Comprendre les séquences d'événements évolutifs répétitives et itératives (Salzburger *et al.*, 2014), ou encore les éléments qui masquent le caractère déterministe, pourrait améliorer notre capacité prédictive. Par exemple, en identifiant des séquences d'événements évolutifs successifs qui se répètent dans l'arbre du vivant (comme les successions végétales en écologie ou les retours aux milieux aquatiques chez les vertébrés).

Rendre la macroévolution prédictive est un objectif très ambitieux et de nombreuses questions restent en suspens. Comment intégrer les différentes échelles géographiques et temporelles ? Quels sont les processus microévolutifs qui laissent un signal à l'échelle macroévolutive ? Les paramètres que l'on peut estimer à l'échelle macroévolutive (ex. vitesse d'évolution des niches) sont-ils utiles pour prédire la microévolution (ex. capacités d'adaptation des espèces) ?

Benton (2009) a proposé que des modèles d'interactions biotiques, comme la compétition, la prédation, ainsi que d'autres facteurs biotiques, façonnent les écosystèmes sur une échelle locale et sur des temps (géologiques) courts, tandis que les facteurs abiotiques, extrinsèques, tels que le climat et les changements environnementaux (événements océanographiques, tectoniques...) façonnent les écosystèmes régionaux et mondiaux sur des millions d'années. Il suggère alors des dynamiques de « *Red Queen* » sur les échelles courtes et locales, et des modèles, ou dynamiques « *Court Jester* », avec notamment une plus grande importance de l'extinction, sur les échelles longues et géographiquement étendues. En appliquant ces dynamiques sur des traits phénotypiques, on pourrait considérer des changements modérés dans le *fitness* et le paysage adaptatif (hauteur des pics, profondeur des

vallées ainsi que des petites relocalisations des pics et vallées), tandis qu'aux échelles temporelles longues et géographiquement étendues, on étudiera l'évolution du paysage de *fitness* dans son ensemble. Le développement croissant des bases de données de plus en plus standardisées pourrait permettre de mieux caractériser les dynamiques du paysage adaptatif au cours du temps et de l'espace par des analyses comparatives à grande échelle. Une meilleure standardisation des études empiriques pourrait aussi être une voie à suivre.

Parmi les nombreuses limites et difficultés d'un tel programme de recherche, il est à noter que, comme la macroévolution se déroule sur des périodes extrêmement longues, certains événements rares deviennent probables (comme l'impact d'un astéroïde lors de la crise K/Pg) rendant la prédictibilité très difficile.

### **Vers une théorie intégrative ?**

Si l'on accepte qu'il y ait des observations/transitions macroévolutives difficiles à expliquer avec des mécanismes microévolutifs, une théorie intégrative reste à développer, en particulier pour identifier les processus macroévolutifs émergents et les mécanismes qui les génèrent. De plus, il existe des rétroactions entre les échelles qui ne sont encore pas prises en compte dans un cadre général : les dynamiques macroévolutives conditionnent les dynamiques écologiques et évolutives actuelles, par exemple, en détermi-

nant le *pool* régional d'espèces ainsi que leurs traits, ou encore en modifiant les conditions environnementales via la création de nouvelles opportunités écologiques ou la modification des niches existantes. La compétition entre espèces (diversité-dépendance) peut aussi affecter la compétition et l'évolution intraspécifique (densité-dépendance). Prendre en compte ces rétroactions possibles de la macroévolution sur les processus microévolutifs reste donc un chantier de recherche difficile et très ouvert.

## **Verrous : des difficultés conceptuelles et pratiques**

### **Décloisonner les communautés : favoriser les échanges et les débats**

Comme indiqué dans les parties précédentes, l'évolution aux échelles micro et macroévolutives a été étudiée avec des approches différentes, sur des échelles temporelles différentes, et par des communautés de scientifiques différentes. Ce constat s'est clairement manifesté dans cet atelier, qui a montré l'utilisation de vocabulaires divergents et des discordances entre les diffé-

rents domaines de recherche. Se comprendre entre communautés, et développer un même vocabulaire, demande du temps et est un travail qui devrait être poursuivi à l'avenir.

Il nous semble important de favoriser les échanges entre généticiens des populations, phylogénéticiens, écologues et paléontologues car ces chercheurs ont des approches et des

connaissances très complémentaires. Nous espérons donc que des groupes de discussions entre différents domaines seront facilités dans les prochaines années (par des rencontres informelles ou des réseaux thématiques). Si les échanges restent trop limités, le risque est que

de nouveaux développements sur les liens entre micro et macroévolution se fassent indépendamment et dans des directions divergentes. Il est également important que ces échanges entre communautés se traduisent dans les formations, en particulier auprès des doctorants.

### **Difficulté de prendre en compte la variation intra-spécifique dans les études macroévolutives**

Quels que soient les modèles biologiques et les objets d'études (génomés, traits), il ressort qu'un point clef est de combiner dans un même cadre d'analyse des données intra et inter-spécifique, et donc de prendre en compte explicitement la variation intraspécifique, aussi bien génétique que plastique, dans les analyses macroévolutives. Cette question peut être mise en parallèle avec la même réflexion qui a émergé il y a une dizaine d'années pour prendre en compte la variation intraspécifique en écologie des communautés (Violle *et al.*, 2012).

Une des difficultés est d'aller au-delà de la prise en compte de la variation intraspécifique simplement comme du bruit dans les données (Rohlf *et al.*, 2014) mais d'incorporer explicitement les processus affectant cette variation

intraspécifique, qui peuvent être différents de ceux de l'échelle macroévolutive. Des modèles statistiques pour combiner ces données et ces processus ont déjà été développés aussi bien pour des traits phénotypiques (Kostikova *et al.*, 2016) que pour des données moléculaires (Latrille *et al.*, 2021) mais il reste encore tout un champ à développer dans cette direction.

Une autre difficulté concerne les données nécessaires à ces analyses. S'il est maintenant assez facile d'obtenir des données de polymorphisme génomique chez de nombreuses espèces, il peut être plus compliqué d'obtenir par exemple des données d'héritabilité multi-trait et multi-espèce. Le problème lié aux données est plus général que cette question et est discuté dans la partie suivante.

### **Difficulté de passer à l'échelle pour l'acquisition de données : quantité et hétérogénéité**

Pour toutes les directions de recherche proposées, des données seront nécessaires pour tester des hypothèses, faire des inférences et des prédictions. L'objectif d'intégrer les échelles micro et macroévolutives impose de collecter des données chez de nombreuses espèces mais suffisamment précises et détaillées au sein de chaque espèce afin de caractériser les processus microévolutifs. Dans certains cas, il pourrait être nécessaire d'aller plus loin que la simple collecte de données pour envisager de mettre en place des études expérimentales comparatives sur un grand nombre d'espèces. Ceci implique des efforts importants de coordination et de standardisation, ainsi que des méthodes efficaces pour gérer et intégrer des données hétérogènes aussi bien en termes de nature (géo-

miques, traits, fossiles/actuels...) que d'échelle (individu, espèce, communauté...).

Il pourrait être intéressant, au moins dans un premier temps, de focaliser les efforts sur des groupes d'organismes pour lesquels les différentes données sont déjà disponibles ou faciles à acquérir, et pour lesquels les possibilités d'étude expérimentales sont suffisamment faciles ; par exemple la présence de bonnes séries de fossiles, des cycles de vie relativement courts permettant des approches expérimentales ou de bonnes connaissances de l'écologie des espèces. Sans chercher à être exhaustif, on peut mentionner des groupes comme les rongeurs, certains groupes de gastéropodes et de phytoplancton, ou des familles de plantes principalement herbacées (via les analyses de pollens).

## Financements

Au final, faire le lien entre micro et macroévolution nécessitera des financements importants pour plusieurs raisons. Les données génomiques intégrant des données populationnelles pour un grand nombre d'espèces sont coûteuses. Les efforts collaboratifs autour des bases de données en vue de l'intégration de

données hétérogènes nécessitent un travail de suivi et de maintien sur le temps long par des personnels techniques dédiés. De même des efforts expérimentaux comparatifs nécessitent de mettre en place et de coordonner des réseaux collaboratifs interdisciplinaires importants à l'échelle internationale.

## RÉFÉRENCES

- Aguilée, R., Gascuel, F., Lambert, A. & Ferriere, R. (2018). Clade diversification dynamics and the biotic and abiotic controls of speciation and extinction rates. *Nat. Com.* 9, e3013. J. G.
- Alexander, D. H., & Lange, K. (2011). Enhancements to the ADMIXTURE algorithm for individual ancestry estimation. *BMC bioinformatics*, 12, 1-6.
- Anderson, E., & Stebbins Jr, G. L. (1954). Hybridization as an evolutionary stimulus. *Evolution*, 8, 378-388.
- Arnold, S. J., Pfrender, M. E., & Jones, A. G. (2001). The adaptive landscape as a conceptual bridge between micro-and macroevolution. *Microevolution rate, pattern, process*, pp. 9-32.
- Avise, J. C. (2000). *Phylogeography: the history and formation of species*. Harvard university press.
- Barley, A. J., Nieto-Montes de Oca, A., Manríquez-Morán, N. L., & Thomson, R. C. (2022). The evolutionary network of whiptail lizards reveals predictable outcomes of hybridization. *Science*, 377, 773-777.
- Bell, G., & Gonzalez, A. (2009). Evolutionary rescue can prevent extinction following environmental change. *Ecol. lett.*, 12, 942-948.
- Benton, M. J. (2009). The Red Queen and the Court Jester: species diversity and the role of biotic and abiotic factors through time. *Science*, 323, 728-732.
- Boucher, F. C., Démary, V., Conti, E., Harmon, L. J., & Uyeda, J. (2018). A general model for estimating macroevolutionary landscapes. *Syst. biol.*, 67, 304-319.
- Cantalapiédra, J. L., Prado, J. L., Hernández Fernández, M., & Alberdi, M. T. (2017). Decoupled ecomorphological evolution and diversification in Neogene-Quaternary horses. *Science*, 355, 627-630.
- Cooney, C. R., Bright, J. A., Capp, E. J., Chira, A. M., Hughes, E. C., Moody, C. J., et al. (2017). Mega-evolutionary dynamics of the adaptive radiation of birds. *Nature*, 542, 344-347.
- Dowling, T. E., & Secor, C. L. (1997). The role of hybridization and introgression in the diversification of animals. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 28, 593-619.
- Dynesius, M., & Jansson, R. (2014). Persistence of within species lineages: a neglected control of speciation rates. *Evolution*, 68, 923-934.
- Egan, S. P., Ragland, G. J., Assour, L., Powell, T. H., Hood, G. R., Emrich, S., et al. (2015). Experimental evidence of genome wide impact of ecological selection during early stages of speciation with gene flow. *Ecol. Lett.*, 18, 817-825.
- Erwin, D. H. (2000). Macroevolution is more than repeated rounds of microevolution. *Evol. dev.*, 2, 78-84.
- Estes, S., & Arnold, S. J. (2007). Resolving the paradox of stasis: models with stabilizing selection explain evolutionary divergence on all timescales. *Am. Nat.*, 169, 227-244.
- Falconer, D. S. & Mackay, T. F. C., (1989). *Introduction to quantitative genetics*. Third Ed. New York, John Wiley & Sons.
- Fitzjohn, R. G. (2010). Quantitative traits and diversification. *Syst. Biol.*, 59, 619-633.
- Freeman, B. G., Rolland, J., Montgomery, G. A., & Schluter, D. (2022). Faster evolution of a premating reproductive barrier is not associated with faster speciation rates in New World passerine birds. *Proc. Roy. Soc. B*, 289, 20211514.
- Goldberg, E. E., Kohn, J. R., Lande, R., Robertson, K. A., Smith, S. A., & Igi, B. (2010). Species selection maintains self-incompatibility. *Science*, 330, 493-495.
- Gould, S. J., & Eldredge, N. (1977). Punctuated equilibria: the tempo and mode of evolution reconsidered. *Paleobiology*, 3, 115-151.
- Gould, S. J. (1998). Gulliver's further travels: the necessity and difficulty of a hierarchical theory of selection. *Phil. Trans. Roy. Soc. B: Biol.*, 353, 307-314.
- Gould, S. J. (1990). *Wonderful life: the Burgess Shale and the nature of history*. WW Norton & Company.
- Hansen, T. F. & Martins, E. P. (1996). Translating between microevolutionary process and macroevolutionary patterns: the correlation structure of interspecific data. *Evolution*, 50, 1404-1417.
- Hardenberg, A. von, & Gonzalez-Voyer, A. (2013). Disentangling Evolutionary Cause-Effect Relationships with Phylogenetic Confirmatory Path Analysis. *Evolution*, 67, 378-387.
- Hartl, D. L., & Clark, A. G. (2006). *Principles of Population Genetics*. Fourth Ed. Oxford, Oxford Univ. Press
- Harmon, L. J., Pennell, M. W., Hénao-Díaz, L. F., Rolland, J., Siple, B. N. & Uyeda, J. C. (2021). Causes and consequences of apparent timescaling across all estimated evolutionary rates. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 52, 587-609.
- Harvey, M. G., Seeholzer, G. F., Smith, B. T., Rabosky, D. L., Cuervo, A. M. &
- Brumfield, R. T. (2017). Positive association between population genetic differentiation and speciation rates in New World birds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, 6328-6333.
- Hautmann, M. (2020). What is macroevolution? *Palaeontology* 63, 1-11.

## RÉFÉRENCES

- Henao Díaz, L. F., Harmon, L. J., Sugawara, M. T., Miller, E. T. & Pennell, M. W. (2019). Macroevolutionary diversification rates show time dependency. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**, 7403-7408.
- Ho, S. Y., Phillips, M. J., Cooper, A. & Drummond, A. J. (2005). Time dependency of molecular rate estimates and systematic overestimation of recent divergence times. *Mol. Biol. Evol.*, **22**, 1561-1568.
- Huxley, J. (1942). *Evolution. The Modern Synthesis*.
- Jablonski, D. (2008). *Species selection: theory and data*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **39**, 501-524.
- Jepsen, G.L., Mayr, E. & Simpson, G.G. (1949). *Genetics, Paleontology, and Evolution*. Princeton: Princeton Univ. Press.
- Kinnison, M. T., & A. P. Hendry. (2001). The pace of modern life II: from rates of contemporary microevolution to pattern and process. *Genetica*, **112**, 145-164.
- Kostikova, A., Silvestro, D., Pearman, P.B. & Salamin, N. (2016). Bridging Inter- and Intraspecific Trait Evolution with a Hierarchical Bayesian Approach. *Syst. Biol.*, **65**, 417-431.
- Lande, R., & Arnold, S. J. (1983). The Measurement of Selection on Correlated Characters. *Evolution*, **37**, 1210-1226.
- Landis, M. J. & Schraiber, J. G. (2017). Pulsed evolution shaped modern vertebrate body sizes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **114**, 13224-13229.
- Latrille, T., Lanore, V., & N. Lartillot. (2021). Inferring Long-Term Effective Population Size with Mutation-Selection Models. *Mol. Biol. Evol.*, **38**, 4573-4587.
- Lewontin, Richard C. (1970). The units of selection. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **1**, 1-18.
- Lobkovsky, A. & Koonin, E. (2012). Replaying the Tape of Life: Quantification of the Predictability of Evolution. *Front. Genet.*, **3**, 246.
- Lynch, M. (2007). *The origin of genome architecture*. Sinauer.
- Lynch, M., & Walsh, B. (1998). *Genetics and analysis of quantitative traits*. First Ed. Sunderland, Sinauer Associates
- MacArthur, R. H. & Wilson, E. O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, Princeton Univ. Press.
- Mallet, J. (2007). Hybrid speciation. *Nature*, **446**, 279-283.
- Marin, J., Achaz, G., Crombach, A. & Lambert, A. (2020). The genomic view of diversification. *J. Evol. Biol.*, **33**, 1387-1404.
- McKinney, M. L. (1997). Extinction vulnerability and selectivity: combining ecological and paleontological views. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **28**, 495-516.
- Mustonen, V., & Lässig, M. (2009). From fitness landscapes to seascapes: non-equilibrium dynamics of selection and adaptation. *Trends Genet.*, **25**, 111-119.
- Nosil, P., Feder, J. L., & Gompert, Z. (2021). Biodiversity, resilience and the stability of evolutionary systems. *Curr. Biol.*, **31**, R1141-R1224.
- Peters, S. E. (2008). Environmental determinants of extinction selectivity in the fossil record. *Nature*, **454**, 626-629.
- Pritchard, J. K., Stephens, M., & Donnelly, P. (2000). Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*, **155**, 945-959.
- Purvis, A. (2008). Phylogenetic Approaches to the Study of Extinction. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **39**, 301-319.
- Rabosky, D. L. (2010). Extinction Rates Should Not Be Estimated from Molecular Phylogenies. *Evolution*, **64**, 1816-1824.
- Rabosky, D. L., & Matute, D. R. (2013). Macroevolutionary speciation rates are decoupled from the evolution of intrinsic reproductive isolation in *Drosophila* and birds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 15354-15359.
- Reznick, D. N. & Ricklefs, R. E. (2009). Darwin's bridge between microevolution and macroevolution. *Nature*, **457**, 837-842.
- Rodrigue, N., & Lartillot, N. (2017). Detecting Adaptation in Protein-Coding Genes Using a Bayesian Site-Heterogeneous Mutation-Selection Codon Substitution Model. *Mol. Biol. Evol.*, **34**, 204-214.
- Rohlf, R. V., P. Harrigan & Nielsen, R. (2014). Modeling Gene Expression Evolution with an Extended Ornstein-Uhlenbeck Process Accounting for Within-Species Variation. *Mol. Biol. Evol.*, **31**, 201-211.
- Roux, C., Fraise, C., Romiguier, J., Anciaux, Y., Galtier, N., & Bierné, N. (2016). Shedding light on the grey zone of speciation along a continuum of genomic divergence. *PLoS Biol.*, **14**, e2000234.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, **413**, 591-596.
- Simpson, G.G. (1944). *Tempo and mode in Evolution*. New York, Columbia Univ. Press.
- Singhal, S., Colli, G. R., Grundler, M. R., Costa, G. C., Prates, I., & Rabosky, D. L. (2022). No link between population isolation and speciation rate in squamate reptiles. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **119**, e2113388119.
- Stanley, S.M. (1979). *Macroevolution: Pattern and Process*. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press.
- Stebbins, G. L. Jr. (1940). The Significance of Polyploidy in Plant Evolution. *Am. Nat.*, **74**, 54-66.
- Sukumaran, J., & Knowles, L. L. (2017). Multispecies coalescent delimits structure, not species. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **114**, 1607-1612.
- Uyeda, J. C., Hansen, T. F., Arnold, S. J., & Pinaar, J. (2011). The million-year wait for macroevolutionary bursts. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 15908-15913.
- Uyeda, J. C., & Harmon, L. J. (2014). A novel Bayesian method for inferring and interpreting the dynamics of adaptive landscapes from phylogenetic comparative data. *Syst. Biol.*, **63**, 902-918.
- Uyeda, J. C., Zenil-Ferguson, R. & Pennell, M. W. (2018). Rethinking phylogenetic comparative methods. *Syst. Biol.*, **67**, 1091-1109.
- Valente, L., Phillimore, A. B., Melo, M., Warren, B. H., Clegg, S. M., Havenstein, K. et al. (2020). A simple dynamic model explains the diversity of island birds worldwide. *Nature*, **579**, 92-96.
- Violle, C., Enquist, B. J., McGill, B. J., Jiang, L. I. N., Albert, C. H., Hulshof, C., et al. (2012). The return of the variance: intraspecific variability in community ecology. *Trends Ecol. Evol.*, **27**, 244-252.



# À la frontière entre **écologie & évolution**

Auteurs : Sara Puijalon (LEHNA), Emanuel Fronhofer (ISEM), Dov Corenblit (GEOLAB), Sylvain Fauçon (EBEA), Pierre-Alexandre Gagnaire (ISEM), Philippe Huneman (IHPST), Oliver Kaltz (ISEM), Natacha Kremer (LBBE), Delphine Legrand (SETE), Jean Secondi (LEHNA), Anne-Charlotte Vaissière (ESE), Bert Van Bocxlaer (EVO-ECO-PALEO), Frédérique Viard (ISEM), Philippe Jarne (CEFE)

## **3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030**

- ▶ **Développer des approches expérimentales, méthodologiques et conceptuelles qui transcendent les séparations historiques entre écologie et évolution**
- ▶ **Produire des modèles pleinement éco-évolutifs, en particulier pour évaluer des propriétés émergentes, qui ne peuvent être expliquées par des modèles seulement écologiques ou évolutifs**
- ▶ **Intégrer l'éco-évolution à l'étude des dynamiques de la biodiversité pour fournir des prédictions dans un contexte de changement environnemental et orienter des stratégies d'interventions durables**

## Introduction

Le champ couvert par l'atelier « À la frontière entre écologie et évolution » étant très large, cette synthèse ne vise pas à dresser un panorama exhaustif de l'existant. L'atelier avait pour objectif de conduire une réflexion sur l'avancement des recherches en « éco-évolution » et de définir des axes de recherche pertinents et novateurs pour les années à venir. Cette synthèse présente les

principaux axes de discussion qui ont animé l'atelier : caractérisation du champ éco-évolutif, divergences/convergences entre écologie et évolution, identification de quatre questions de recherche futures (éco-évolution rapide, éco-évolution lente, interactions biotiques, applications de l'éco-évolution aux environnements anthropisés) et les verrous à lever pour les études en éco-évolution.

## Écologie, évolution, éco-évolution

### Ce qui sépare, ce qui rapproche

Les causes de la séparation entre écologie et évolution sont de diverses natures, notamment historiques et sociologiques, incluant des questions de temporalités, ou de nature des forces et processus considérés, ou encore liés aux pratiques conceptuelles, techniques ou méthodologiques des différentes disciplines.

### Causes historiques et sociologiques

Évolution et écologie ont longtemps eu une dynamique propre, liée à la construction et au développement de ces deux sciences. Or, on sait depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle que les changements évolutifs et écologiques peuvent se produire sur des échelles de temps similaires, nécessitant alors un rapprochement entre écologie et évolution (Chitty, 1967 ; Pimentel, 1961). Cette idée n'a été réactualisée que récemment grâce à des avancées conceptuelles, des études à long terme et des progrès en modélisation mathématique qui l'ont rendue opérationnelle (Huneman, 2019). Depuis le début des années 2000, la dynamique et les rétroactions éco-évolutives, ou éco-évolution, ont connu un engouement important (Bassar *et al.*, 2021) se traduisant par la publication de revues, perspectives (Fussmann *et al.*, 2007 ; Lion, 2018 ; Pelletier *et al.*, 2009 ; Post & Palkovacs, 2009), numéros spéciaux (numéro spécial BES « *Eco-evolutionary dynamics across scales* » 2019) et livres entiers (Hendry, 2017 ; McPeck, 2017). Le manque de

dialogue historique entre écologie et l'évolution (Huneman, 2019 ; Loreau, 2010) a conduit à leur intégration imparfaite dans les travaux actuels. La plupart des travaux qualifiés d'éco-évolution s'appuient fortement sur la biologie évolutive, l'écologie n'étant souvent comprise que comme démographie pure, ou réduite à celle-ci, et les influences de l'écologie fonctionnelle ou de l'écologie des écosystèmes sur les études empiriques et conceptuelles restent relativement faibles. Même si ce manque de synthèse, qui remonte aux travaux fondateurs de Pimentel (1961) et Chitty (1967), est connu depuis plus de 10 ans déjà (Matthews *et al.*, 2011), les progrès réalisés semblent limités (voir pour des exceptions, par exemple, El-Sabaawi *et al.*, 2015 ; Kylafis & Loreau, 2008). Le plus souvent, l'écologie, c'est-à-dire l'environnement biotique et physique, sert uniquement de « théâtre » à la « pièce de théâtre évolutive » centrée sur les gènes. Même l'école de la « génétique écologique » (Whitham *et al.*, 2006) ne s'intéressait que peu à l'écologie, et aucune rétroaction éco-évolutive n'était envisagée. Inversement, historiquement, les écologues fonctionnels semblent s'être peu intéressés aux processus évolutifs pour expliquer la structure et le fonctionnement des communautés et écosystèmes (Huneman, 2019 ; Loreau, 2010).

Au-delà de ces divergences historiques, la « séparation » entre écologie et évolution s'explique également par des raisons sociologiques propres

à la dynamique des communautés scientifiques. Les deux sciences étaient en construction au début du XX<sup>e</sup> siècle et ont effectivement eu leur dynamique propre de consolidation, via la création de chaires, de départements universitaires, de formations ou de journaux (ex. aux Etats-Unis, la revue *Ecology* est créée en 1920 et la revue *Evolution* en 1945). Cette dynamique s'est aussi appuyée sur des concepts et définitions propres (ex. valeur sélective en évolution et niche en écologie) et des niveaux biologiques étudiés (ex. centrage populationnel en évolution et communautaire en écologie), comme développé plus bas. Le fonctionnement du financement de la recherche, largement basé sur des projets ciblés, a probablement aussi pu conduire à une séparation entre disciplines et à une faible pression pour aller vers une intégration.

### **Temporalité et échelles de temps**

Il a longtemps été considéré que les processus relevant de l'écologie et de l'évolution se produisaient sur des temporalités différentes, courte en écologie, longue en évolution. Cela conduit d'ailleurs à se poser la question de savoir si les écologues ont (toujours) besoin de l'évolution pour expliquer les phénomènes d'interactions observés à l'échelle de l'écosystème. Par exemple, les éléphants ont une durée de vie longue, et « n'ont pas le temps » de réagir à une variation environnementale rapide de façon évolutive. En d'autres termes, les échelles de temps peuvent être découplées. Pourtant, des études ont montré que, même chez les éléphants, l'évolution pouvait aller très vite (ex. la perte des défenses en réaction à la pression de chasse et de braconnage). La quantification des taux d'évolution a démontré qu'ils sont souvent plus élevés qu'on ne le pensait, surtout s'ils sont mesurés sur de courtes échelles de temps (Hendry & Kinnison, 1999). Des données intégrant une diversité d'organismes, des protozoaires aux humains, ont permis de montrer que l'évolution, mesurée par le taux de changement phénotypique, peut être rapide, mais est généralement légèrement plus lente (d'un facteur < 10) que la dynamique écologique, estimée par le taux de changement des populations (DeLong *et al.*, 2016). Ces études se concentrent sur les changements quantitatifs des phénotypes, mais les changements qualitatifs, tels que les innovations clés (Wagner, 2011), pourraient nécessiter

des changements plus fondamentaux dans les voies métaboliques ou les plans d'organisation, et se produisent moins fréquemment, surtout si des contingences historiques sont impliquées (Blount *et al.*, 2008).

Certains auteurs insistent sur la similitude des échelles de temps écologique et évolutive dans la définition la plus correcte de l'éco-évolution (Bassar *et al.*, 2021), en supposant implicitement qu'elles sont toutes deux rapides. Cela a conduit à des études sur les conditions favorisant une évolution rapide, comme l'architecture génétique des traits impliqués (Deshpande & Fronhofer, 2022). Les interactions éco-évolutives dans lesquelles les dynamiques écologiques et évolutives sont simultanément rapides ont été plus largement étudiées que lorsqu'elles sont lentes (Pausas & Bond, 2022). Ces rétractions éco-évolutives, rapides d'une part et lentes d'autre part, ont donné lieu à deux discussions au sein de l'atelier (voir ci-dessous).

### **Forces et processus**

La biologie évolutive a depuis longtemps formalisé le fonctionnement des gènes et populations sous l'impact de forces ou de processus (ex. la taille des populations qui impacte directement l'effet respectif de la dérive génétique et de la sélection naturelle ou encore la migration). Une telle trame n'apparaît en écologie que dans les années 1960 (MacArthur & Wilson, 1967) et a été revivifiée plus récemment (Hubbell, 2001 ; Leibold *et al.*, 2004 ; Vellend, 2010) avec, par exemple, la spéciation qui fait apparaître de nouvelles espèces, la dérive écologique ou la compétition interspécifique. Ces forces et processus ont été largement considérés indépendamment jusqu'à récemment. Cependant, il existe des analogies « naturelles » entre les niveaux des populations dans les espèces et des espèces dans les communautés biologiques (Hendry, 2017 ; Vellend, 2010) – les notions de métapopulation et de métacommunauté sont une expression directe de cette analogie. On peut aussi généraliser au niveau de l'écosystème (Loreau, 2010). Ces analogies doivent permettre d'analyser la dynamique de la biodiversité conjointement à différents niveaux d'intégration du vivant, en fonction des conditions environnementales qui vont, par exemple, agir directement sur la dynamique des populations de toutes les espèces.

Notons cependant que toute analogie a ses limites – ici, la sélection naturelle au niveau populationnel (interactions entre allèles) ne peut pas prendre les mêmes formes que la variété des interactions interspécifiques (mutualisme, parasitisme, compétition, prédation).

### Outils

Une autre cause de la séparation entre écologie et évolution pourrait être liée aux outils utilisés. Par exemple, les différentes disciplines se sont appropriées les outils de la biologie moléculaire de manière très différente : l'entrée en force de l'ADN dans les études évolutives dans les années 1980 a effectivement apporté des techniques et approches nouvelles que l'écologie non évolutive n'a saisi qu'une bonne vingtaine d'années plus tard. À ce jour, des approches telles que le metabarcodage ADN, et de manière générale la métagénomique, transcendent les disciplines et pourraient permettre de les rassembler. À revers, les évolutionnistes ont mis beaucoup plus de temps que les écologues à se saisir des outils de la chimie (ex. chromatographie), mais le retard a été largement rattrapé, par exemple en écologie (évolutive) chimique. De manière similaire, l'utilisation d'unités et de métriques différentes en écologie et en évolution (flux

quantifiant les processus et les flux de matière et d'énergie en écologie vs. *fitness* quantifiant de la descendance transmise aux générations suivantes en évolution (Brown *et al.*, 2018)) qui freine la convergence entre disciplines, aurait également pu faire l'objet d'une discussion spécifique. On peut donc penser que les outils et concepts peuvent être aussi des objets de rassemblement, renvoyant à la notion d'objets frontières en sociologie des sciences.

Si ces différents éléments peuvent expliquer la relative séparation entre écologie et évolution, il est important de noter que des différences existent entre les sous-disciplines, avec par exemple une intégration beaucoup plus précoce des questions évolutives par l'écologie des communautés que par l'écologie fonctionnelle (voir par exemple les travaux de R. Ricklefs ou S. Levin dès les années 1990). Par ailleurs, il est également important de garder à l'esprit que l'écologie et l'évolution sont en interface avec d'autres champs disciplinaires, telles que la biologie, les sciences de l'univers, les sciences physiques ou les sciences humaines et sociales (ex. l'étude de la structure et du fonctionnement des écosystèmes nécessite la prise en compte des interactions entre les organismes ou les sociétés et les processus physico-chimiques), qui à la fois contraignent et enrichissent les études en écologie et en évolution.

### Interactions éco-évolutives

L'intérêt récent pour les études rapprochant écologie et évolution a conduit à des questionnements sur ce qui relève réellement de l'éco-évolution ou au contraire simplement de processus écologiques ou évolutifs. Bassar *et al.* (2021) proposent de restreindre l'utilisation du terme « dynamique éco-évolutive » aux situations où les dynamiques écologiques et évolutives sont couplées en des rétroactions réciproques en excluant de la définition les situations où un changement écologique (évolutif) influence simplement un changement évolutif (écologique), sans qu'il y ait de rétroaction. Ils insistent également sur le fait qu'il n'y

a « aucune séparation dans le temps entre les dynamiques écologiques et évolutives », en supposant implicitement qu'elles sont toutes deux rapides. Cette synchronisation des échelles de temps conduit à des phénomènes nouveaux et émergents qui ne peuvent être compris dans un contexte purement écologique ou évolutif. Il est à noter que ces discussions peuvent paraître sémantiques, en maintenant sous un même terme des situations comparables, mais elles ont aussi une valeur causale, en mettant en exergue les forces en œuvre et leurs interactions entre niveaux de biodiversité (Bassar *et al.*, 2021).

## Questions de recherches futures

Quatre grandes questions de recherches ont été discutées au cours de quatre sous-ateliers dédiés : éco-évolution rapide, éco-évolution lente, interactions biotiques, applications de l'éco-évolution aux environnements anthropisés.

### Éco-évolution rapide

Comme on l'a vu ci-dessus, il est maintenant admis que les échelles de temps écologiques et évolutives puissent concorder, ce qui sous-entend l'existence de dynamiques éco-évolutives et de boucles de rétroaction à échelle de temps contemporaine. Cependant, les exemples empiriques restent peu nombreux et les modèles théoriques peu développés.

Cela limite notre capacité :

- à quantifier l'importance de l'éco-évolution rapide dans le fonctionnement des écosystèmes ;
- à déterminer les composantes écologiques et évolutives principalement affectées par les changements rapides (traits phénotypiques, éléments des réseaux trophiques, flux de matière...) ;
- à prédire de quelle façon les écosystèmes peuvent répondre à des changements environnementaux rapides (drastiques) tels que ceux imposés par les sociétés humaines.

### Limitations conceptuelles et méthodologiques

Malgré le consensus général sur la difficulté à dresser une claire distinction entre écologie et évolution, l'évolution est souvent considérée comme un paramètre de nuisance dans les études écologiques. Ce n'est qu'une fois la dynamique écologique étudiée que certains paramètres évolutifs sont parfois ajoutés. Toutefois, il apparaît clairement que l'intégration des paramètres évolutifs est plus simple dans le cas des études de communautés microbiennes, et qu'à l'inverse, les études sur les métazoaires posent un problème méthodologique du fait notamment de leur temps de génération souvent long, conduisant à une position particulière de l'écologie microbienne dans les études éco-évolutives.

D'un point de vue évolutif, il apparaît que l'étude des traits d'histoire de vie ne peut se faire qu'à la lumière des informations démographiques

pour comprendre les dynamiques éco-évolutives rapides, mais que celles-ci sont souvent très difficiles à obtenir pour beaucoup de systèmes d'étude. Par ailleurs, les caractères utilisés en phylogénie pour décrire les processus évolutifs sont, dans la plupart des cas, ceux qui font le moins le lien avec l'écologie (caractères convergents). L'ensemble soulève la question des métriques à utiliser pour avoir une approche permettant une étude pertinente des dynamiques éco-évolutives rapides.

Il apparaît également un manque criant de modèles explicatifs et prédictifs dans le domaine, en raison d'une implémentation difficile. Ceci concerne surtout les modèles qui intègrent des mécanismes à plusieurs échelles, notamment du génome au méta écosystème.

Enfin, l'évolution rapide (modifications de la fréquence des phénotypes dans les populations) peut n'avoir parfois aucune incidence sur le fonctionnement des écosystèmes, alors que les changements démographiques pourraient avoir plus d'impact. Cependant, il est apparu que nous manquons cruellement d'éléments quantitatifs pour dresser des généralités sur les patterns d'éco-évolution rapide les plus fréquents.

### Perspectives

Elles visent à lever les verrous mentionnés plus haut. Tout d'abord, il serait pertinent de concevoir a priori des mesures de paramètres évolutifs dans les études écologiques, par exemple pour quantifier l'impact des boucles éco-évolutives sur les écosystèmes, en se focalisant notamment sur la plasticité phénotypique. L'utilisation d'organismes modèles présentant des atouts dans les deux disciplines, par exemple des unicellulaires, pourrait servir de « preuve de concept » aux développements méthodologiques expérimentaux possibles, notamment dans des plateformes expérimentales type méso- et microcosmes. Pour les autres groupes biologiques, une réflexion sur les traits les plus

pertinents à étudier permettrait de faciliter l'étude des dynamiques éco-évolutives rapides. Cette approche pourrait consister en un focus sur l'évolution des traits dont la fonctionnalité dans les écosystèmes est caractérisée en amont, ou sur les traits les plus plastiques, c'est-à-dire parmi ceux susceptibles d'engendrer des

modifications très rapides dans les fonctions écosystémiques. D'un point de vue théorique, ceci implique d'inclure la plasticité phénotypique en développant par exemple des nouveaux types de modèles en « *nested networks* » qui demandent une approche interdisciplinaire (biologie, mathématiques, informatique, physique).

### Éco-évolution lente

Les interactions éco-évolutives se déroulant sur le temps long, à des échelles spatiales régionales et même planétaire, ont été moins étudiées que les interactions rapides. Dans ce cas, la dynamique écologique se produit à des échelles de temps beaucoup plus longues que la démographie. En effet, elle est définie à l'échelle régionale par des paramètres géologiques ou géomorphologiques lents qui ont un effet non seulement sur les propriétés abiotiques de l'écosystème (ex. via les conditions physico-chimiques, la lixiviation des nutriments, les flux et l'organisation de la matière minérale), mais aussi sur la composante biotique, parce que la géologie et la géomorphologie constituent la matrice environnementale dans laquelle la dynamique du (méta)écosystème se joue. Les réponses évolutives à ces pressions de sélection sont lentes ou rares, comme dans le cas d'innovations clés qui nécessitent des changements fondamentaux dans les voies métaboliques ou le plan d'organisation. Les effets des interactions éco-évolutives sur le temps long peuvent être spécifiques à un taxon mais, le plus souvent, elles affectent des écosystèmes entiers et donc une très grande variété de taxons qui interagissent au sein de réseaux trophiques et non-trophiques gouvernés par des rétroactions abiotiques-biotiques. Les exemples incluent la dynamique de l'oxygène sur Terre et l'émergence des eucaryotes et des plantes terrestres ou la construction des plaines alluviales et des cordons dunaires par les plantes vasculaires dans les écosystèmes riverains et côtiers. La compréhension des rétroactions éco-évolutives lentes représente un enjeu scientifique interdisciplinaire important, déjà identifié lors des deux précédentes prospectives de CNRS Écologie & Environnement.

Il existe une diversité d'approches et de types de questionnements éco-évolutifs sur le temps long qui peuvent être considérées à la fois comme un avantage et un frein à la mise en place d'une

démarche éco-évolutive lente standardisée. L'avantage réside dans la grande ouverture thématique et la possibilité de création de nouveaux groupes de travail interdisciplinaires ciblant des questions éco-évolutives lentes à l'interface entre sciences de la vie, sciences de la terre et sciences humaines et sociales. La difficulté réside dans la mise en place de passerelles conceptuelles et méthodologiques interdisciplinaires communes pour aborder les nouveaux questionnements.

### Verrous

Une autre difficulté concerne la définition du « temps long » dans une perspective éco-évolutive. De manière classique, le temps long se définirait par plusieurs dizaines à centaines de milliers d'années, ou par une échelle pluriséculaire dans les études paléoécologiques. Un décentrage de cette perspective classique pour utiliser plutôt le nombre de générations pourrait représenter une solution pour distinguer le temps long du temps court. La combinaison de l'approche classique basée sur la durée et de celle basée sur le nombre de générations devrait permettre de proposer une définition plus formelle du temps long dans une perspective éco-évolutive.

Par ailleurs, les approches des rétroactions éco-évolutives lentes apparaissent diverses. Les archives sédimentaires permettent de remonter très loin dans le temps, mais sont le plus souvent fragmentaires, avec des hiatus plus ou moins importants entre les observations. Ces hiatus et la difficulté de lier ces observations entre elles et avec le contexte environnemental, peuvent impacter notre capacité à produire des modèles puissants et détaillés (ex. les interactions biotiques peuvent être en équilibre ou pas et la durée des phases d'équilibres demeure difficile d'accès dans les archives sédimentaires). Au contraire, les travaux axés sur la biologie des organismes et le fonctionnement actuel



des écosystèmes permettent une analyse des phénomènes sur beaucoup moins de générations, mais avec des données d'observation ou expérimentales plus continues, et donc de meilleures quantifications et maîtrise des processus. Ce constat souligne l'intérêt d'un couplage entre approches paléontologiques et actuelles (empiriques et expérimentales).

### **Enjeux**

Le premier enjeu identifié concerne la question de la stabilité (résistance, résilience et seuils critiques de bascule) des écosystèmes en relation avec les processus éco-évolutifs lents. Cette notion de stabilité écosystémique semble centrale avec des questions non résolues au sujet des couplages entre mécanismes évolutifs et écologiques assurant sur le long terme la stabilité des écosystèmes et de leurs fonctions. La situation actuelle de crise climatique et environnementale rend cette question extrêmement pertinente et urgente. Elle est toutefois complexe et réclamera au préalable un « débroussaillage » conceptuel et méthodologique. Une des difficultés pour définir

les interactions éco-évolutives sur le temps long réside dans le fait que ces interactions peuvent entraîner également des effets non-linéaires à court terme.

Un autre enjeu majeur de la caractérisation des interactions éco-évolutives lentes réside dans la capacité à prédire si les interactions observées aux niveaux évolutif et écologique sont en équilibre, et sinon, comment leur changement peut impacter les écosystèmes associés et sur quel pas de temps. Cet objectif reste complexe dans une optique rétrospective car, comme évoqué ci-dessus, les archives fossiles sont souvent incomplètes et les études prospectives expérimentales des changements sur le long terme ne couvriraient finalement que des trajectoires d'ajustement éco-évolutives de communautés de micro-organismes. Il paraît nécessaire d'acquérir des jeux de données plus complets et standardisés sur le long terme ainsi que des méthodes et approches plus puissantes afin d'exploiter ces données. Une démarche multi-proxy soutenue par l'utilisation de nouveaux outils tels que par exemple l'ADN environnemental, la métabolomique et la géochimie semble souhaitable.

### **Interactions biotiques durables**

Les dynamiques éco-évolutives sont parfois perçues, à tort, comme des interactions entre compartiments abiotiques et biotiques, alors qu'elles peuvent également concerner des interactions uniquement biotiques - des exemples de référence du champ éco-évolutif impliquent de fait des interactions biotiques. On s'intéressera ici aux interactions biotiques durables, qui vont du mutualisme au parasitisme. Ces interactions sont à l'origine de processus co-évolutifs entre les partenaires, et peuvent varier et évoluer en fonction du contexte environnemental, sur une échelle temporelle plus ou moins longue (éco-évolution lente ou rapide).

#### **De l'écologie à l'évolution et réciproquement**

Si l'on considère les interactions hôtes-parasites, ces interactions entre partenaires produisent des dynamiques démographiques spécifiques, de type cyclique ou épidémique. Elles résultent d'effets sélectifs négatifs réciproques, ce qui peut favoriser des changements évolutifs dans la

résistance de l'hôte ou l'infectivité du parasite. De même, les changements dans la démographie de l'hôte (par exemple, la mortalité de l'hôte induite par le parasite ou par un facteur extrinsèque) déterminent l'évolution des niveaux optimaux de virulence. En ce sens, la dynamique éco-évolutive est au cœur même de la façon dont nous conceptualisons la (co)évolution dans les interactions antagonistes. Cependant, la formalisation explicite des rétroactions éco-évolutives dans les populations dynamiques qui ne sont pas à l'équilibre est relativement récente. Divers modèles (et quelques expériences) ont désormais inclus des boucles de rétroaction entre l'action du parasite, la disponibilité d'hôtes sensibles et l'évolution du parasite. Alors que les études se concentrent souvent sur les aspects « écologie-vers-évolution », l'intégration de la partie « évolution-vers-écologie » devrait permettre de répondre à de nombreuses questions, notamment par la modélisation prédictive. Par exemple, quelle quantité d'évolution faut-il ajouter aux modèles épidémiologiques pour prédire correctement l'émergence et la propagation d'une épidémie, ou encore les types « épi-

démiques » plus virulents seront-ils finalement remplacés par des types « endémiques » moins virulents ? Les réponses à ces questions ne sont pas simples. En effet, la dynamique éco-évolutive se joue probablement à différents niveaux (au sein et entre hôtes), chacun avec sa propre dynamique démographique et de sélection, et des possibilités de rétroactions entre niveaux. L'intégration de ces différents niveaux et traits peut modifier considérablement nos prédictions.

L'étude des interactions biotiques a longtemps été limitée à des études entre deux partenaires alors que les interactions multipartenaires jouent des rôles écologique et évolutif majeurs. Dans les « holobiontes » (écosystèmes hôtes abritant une multitude de partenaires microbiens), les interactions complexes entre partenaires, et entre partenaires et hôtes, conduisent à des boucles de rétroaction qu'il apparaît nécessaire d'étudier pour caractériser le potentiel (co-)évolutif du système dans son ensemble. D'autre part, la réponse des partenaires aux variations environnementales impacte aussi les processus évolutifs, notamment adaptatifs. Ainsi, la dynamique des populations et les réponses à la sélection peuvent être dirigées par de nombreux acteurs et forces, et impliquer des traits très différents. On aboutit ainsi à des dynamiques éco-évolutives « diffuses », incorporant des boucles de rétroaction éco-évolutives imbriquées, et dont la trajectoire va dépendre des interactions biotiques et abiotiques, mais aussi des corrélations (génétiques) entre traits. Il convient donc de prendre en compte cette complexité dans l'analyse des réponses écologiques et évolutives à des variations environnementales (en particulier rapides).

### Enjeux et perspectives

L'intérêt d'une perspective éco-évolutive explicite dépend du système biologique, car il n'est pas

toujours possible de suivre les changements évolutifs, par exemple dans les grands organismes ou dans les populations naturelles. Il s'agit d'un point clé à considérer pour éviter que les dynamiques écologiques ne puissent « cacher » des changements évolutifs. Par ailleurs, il apparaît pertinent d'ajouter une perspective démographique ou populationnelle (ex. en suivant la dynamique de symbiotes au sein de l'hôte ou en mesurant le succès de la transmission pour des groupes d'individus) aux études de potentiel évolutif (ex. en comparant différents génotypes d'hôtes ou de symbiotes), ce qui permettra également d'estimer les covariations génétiques entre traits pertinents. Enfin, une approche d'évolution expérimentale, quand elle est possible, doit permettre d'incorporer des forces et réponses éco-dynamiques de façon explicite, tout en intégrant des dynamiques démographiques et épidémiologiques réalistes conduisant à des réponses évolutives elles-mêmes réalistes. Ces études de rétroactions éco-évolutives pourraient aussi permettre de caractériser finement les impacts de l'écologie sur l'évolution, et *vice versa*, sous différents scénarios épidémiologiques ou environnementaux, ce qui permettrait de faciliter la prédiction des systèmes en interaction.

La caractérisation des changements génotypiques et phénotypiques des organismes en interaction nécessite de considérer non seulement ses traits de vie (ex. survie, reproduction), mais également une multitude de traits définissant ses interactions biotiques (ex. diversité de la communauté symbiotique au sein d'un hôte, échanges métaboliques entre partenaires). L'enjeu est de prendre en compte cette complexité phénotypique pour comprendre les mécanismes à l'origine des variations éco-évolutives, en couplant les échelles d'étude (spatiale, temporelle, niveaux de biodiversité) dans des approches multidimensionnelles (ex. pour les traits).

### Applications de l'éco-évolution aux environnements anthropisés

Les systèmes anthropisés peuvent représenter des modèles d'étude pertinents pour comprendre les interactions éco-évolutives rapides sous forte pression environnementale, et donc fortes pressions de sélection (voir ci-dessus). En effet, leur dynamique se fait à l'échelle de quelques (à quelques dizaines de) générations, ce qui permet de les suivre « en temps réel »,

avec des caractéristiques communes et un grand nombre de répliques. En outre, ils offrent des contextes suffisamment différents pour mener des études comparatives. Trois cas d'étude ont été discutés au cours de l'atelier : la domestication et culture d'espèces sauvages, les invasions biologiques et les milieux artificiels ou urbanisés.

## Cas d'étude

Dans le premier cas, le principal processus évolutif est la domestication impliquant souvent une forte sélection sur quelques traits d'intérêt comme le taux de croissance ou la biomasse produite. La sélection est soit centrée sur la production de lignées ou cultivars, soit relâchée (dite « inconsciente »), basée sur la sélection de géniteurs en fonction de leur phénotype lors de leur mise en culture. D'autres forces évolutives peuvent jouer comme les flux de gènes entre populations cultivées et sauvages, ou l'évolution des souches de pathogènes dans les fermes et élevages. Les populations cultivées vont affecter les caractéristiques physico-chimiques de l'environnement ou les chaînes trophiques, mais peuvent aussi constituer des réservoirs importants de maladies. Dans ce contexte, les interactions éco-évolutives concernent notamment le rôle de la diversité génétique et des traits phénotypiques sélectionnés des populations cultivées sur la diversité du microbiome associé, et sur la diversité de ses fonctions (ex. cycles biogéochimiques au sein des cultures et habitats naturels voisins).

Le deuxième cas d'étude concerne les invasions biologiques. Sur le court terme, de fortes pressions de sélection peuvent s'exercer sur les espèces exotiques envahissantes pour tout ce qui touche à leur dispersion et à la compétition dans les communautés réceptrices, impliquant des effets fondateurs ou de « *allele surfing* », dépendant en particulier de la pression de propagules dispersantes. Les caractéristiques génétiques de la population introduite peuvent moduler l'effet sur l'écosystème, tandis que les caractéristiques de l'écosystème récepteur peuvent affecter la performance de la population introduite. Sur le long terme, les changements sont plus complexes, avec différents scénarios possibles comme l'émergence de l'atténuation de ces effets après la phase initiale (par exemple, des extinctions de populations bien installées). Les processus sous-jacents peuvent être multiples, comme des changements démographiques endogènes qui modifient l'intensité de la compétition ou des modifications des communautés locales ou des réorganisations des réseaux trophiques. Un enjeu considérable est alors de capter la complexité des rétroactions éco-évolutives, tant sur le plan fondamental que pour la gestion des impacts des espèces introduites (pour éviter d'aboutir à des conséquences plutôt négatives, ou en tout cas mal contrôlées).

De manière analogue aux invasions biologiques, les milieux urbanisés ou artificialisés constituent des modèles intéressants pour l'étude des interactions éco-évolutives, parce qu'il s'y exerce de très fortes pressions de sélection dans des gradients environnementaux forts. De nombreuses études ont documenté des changements de traits d'histoire de vie (ex. comportements, reproduction, alimentation), des adaptations spécifiques et des processus de rétroactions éco-évolutives dans ces habitats particuliers (par ex., des boucles démo-environnementales positives conduisant à des explosions de populations et de nouvelles adaptations spécifiques aux milieux anthropisés). Se pose aussi la question de l'influence de ces milieux sur les populations et communautés présentes dans les écosystèmes plus « naturels » avoisinants, par exemple via des processus de maladaptation génétique induits par des flux de gènes asymétriques, depuis les milieux anthropisés.

## Enjeux et perspectives

Ces cas d'étude interrogent sur la construction de nouveaux écosystèmes, ou d'écosystèmes hybrides comprenant une proportion importante d'espèces ou de génotypes, importés ou modifiés par les activités humaines, dans lesquels de nouveaux réseaux d'interactions interspécifiques se créent. Par exemple, quelle sera leur résilience vis-à-vis de perturbations, quels services écosystémiques maintenus ou nouveaux pourront-ils fournir, ou encore, quelles adaptations particulières peuvent émerger et avec quelles rétroactions sur les dynamiques des populations et des communautés qui les occupent ?

Les systèmes anthropisés conduisent donc à de nouveaux écosystèmes, incluant des espèces/communautés qui peuvent être largement modifiées par les activités humaines. Cela pose de nombreuses questions éco-évolutives, en particulier pour ce qui concerne la résilience de ces systèmes ou les services écosystémiques rendus, et donc plus généralement des propriétés qui peuvent émerger de l'anthropisation. Au-delà des cas d'études considérés ci-dessus, il semble important d'identifier ces propriétés de manière générique, et de croiser les facteurs d'anthropisation. Cela paraît critique si l'on souhaite développer une bonne capacité de prédiction et d'intervention (ou de laisser-faire). Il est donc nécessaire d'inclure une vision éco-évolutive dans le domaine

des « solutions fondées sur la nature » ou d'ingénierie écologique, de façon à renforcer la durabilité des solutions mises en place comme réponses à l'anthropisation. Une approche socio-écosystémique devient alors plus que nécessaire, et donc un recours à des approches inter- et transdisciplinaires. Un point de vigilance doit être soulevé :

cette gestion de l'anthropisation attire naturellement des financements, en particulier liés aux politiques publiques, soutenant des projets qui peuvent vite être très finalisés et ne permettant alors pas d'aborder suffisamment les questions de dynamiques éco-évolutives plus éloignées des objectifs des financeurs.

## Verrous à lever et outils à développer

Au-delà des verrous, enjeux et perspectives présentés spécifiquement dans les quatre questions de recherche, l'atelier a également permis d'identifier des verrous assez généraux qui freinent le développement des études en éco-évolution, certains découlant des séparations historiques entre écologie et évolution, alors que d'autres sont inhérents aux études éco-évolutives.

- Il est nécessaire de développer des modèles pleinement éco-évolutifs, en particulier pour évaluer des propriétés émergentes et fournir des prédictions.
- À l'heure actuelle, il existe peu de modèles biologiques permettant des études, en particulier expérimentales, en éco-évolution et ces modèles diffèrent généralement selon les problématiques du fait de leurs atouts et contraintes. Par exemple, les micro-organismes permettent de réaliser plus facilement des études d'évolution expérimentale mais posent des difficultés de résolution à l'échelle des espèces microbiennes ; au contraire, il est difficile de faire de l'évolution expérimentale sur les macro-organismes mais les archives sédimentaires permettent d'aborder certaines questions d'évolution en temps profond. L'ensemble conduit à ce que les résultats expérimentaux en éco-évolution soient relativement disparates, réduisant ainsi la possibilité de généralisation.
- Les études en éco-évolution sont souvent pluri- et/ou interdisciplinaires (ex. géologie et géomorphologie pour l'éco-évolution lente, sciences humaines et sociales pour l'éco-évolution dans les systèmes anthropisés). A contrario, certaines disciplines (écologie comportementale) semblent être très peu intégrées aux études en éco-évolution, alors même qu'elles pourraient apporter des éléments importants dans la compréhension des processus. Il est

nécessaire de maintenir ces interactions avec d'autres disciplines mais également de veiller à développer des approches conceptuelles, méthodologiques ou expérimentales cohérentes en éco-évolution.

- Un renforcement d'outils adaptés aux études en éco-évolution est aussi critique, en particulier pour développer des approches d'éco-évolution expérimentale sur des micro-organismes à court temps de génération, pour l'heure encore peu considérés, mais aussi pour coupler des approches « omiques » utilisées en évolution (génomique) et en écologie (métabolomique, transcriptomique, protéomique), difficiles à articuler en raison d'échelles de temps différentes focales de ces disciplines.

Au-delà des actions spécifiques d'ores et déjà initiées par CNRS Écologie & Environnement (ex. numéro spécial en cours sur l'éco-évolution dans *Ecology Letters*, création d'une chaire de professeur junior « Approches évolutives et fonctionnelles du fonctionnement des écosystèmes » en 2022), plusieurs propositions ont émergé :

- élargir le spectre d'organismes étudiés sur des plateformes expérimentales, actuellement limités à quelques microorganismes et espèces modèles, en particulier pour inclure des espèces à cycle de vie long ;
- soutenir les études à long-terme et à vaste échelle spatiale ;
- formaliser des lieux d'interactions et de discussion (RT, symposiums dans des conférences généralistes ex. *sfe2...*) afin de renforcer l'émergence de projets impliquant des chercheurs de différentes spécialités et modèles d'études ;
- construire des appels à projets dédiés, possiblement sur des questions spécifiques (PEPS, MITI pour stimuler l'interdisciplinarité...).

## Conclusions - Perspectives

La compréhension de la dynamique de la biodiversité, actuelle ou passée, et la prédiction de ses trajectoires futures, nécessite d'intégrer une approche éco-évolutive. Différents exemples de dynamiques éco-évolutives ont été présentés au cours de l'atelier, en insistant sur un élargissement des échelles de temps de l'écologie et de l'évolution (de l'éco-évolution rapide vers lente), et sur des interactions et rétroactions entre organismes et environnement mais aussi entre organismes (Interactions biotiques). L'exemple des systèmes anthropisés (voir « Applications de l'éco-évolution aux environnements anthropisés ») met en lumière l'intérêt du cadre conceptuel de l'éco-évolution pour comprendre à la fois la dynamique de ces systèmes et fournir des prédictions et des outils d'aide à la gestion des socio-écosystèmes.

Notre réflexion a mis en évidence des besoins et verrous expérimentaux et méthodologiques, conceptuels et de modélisation. Il est également important d'intégrer des approches interdisciplinaires impliquant au-delà des sciences cœur de

la biodiversité (ex. géomorphologie ou sciences humaines et sociales), parfois au-delà des champs disciplinaires couverts par CNRS Écologie & Environnement. Il apparaît donc important que les actions déjà initiées par celui-ci en éco-évolution soient complétées par des soutiens au développement d'outils et à l'émergence de projets.

Enfin, la capacité à fournir des prévisions à partir des modèles d'éco-évolution représente un défi majeur pour comprendre la future dynamique de la biodiversité dans un contexte de changements environnementaux. Les prévisions sont également des éléments importants pour orienter des stratégies d'interventions durables et fondées sur la nature (protection ou restauration des écosystèmes...). Le cadre conceptuel offert par l'éco-évolution peut fournir des outils pour aborder une diversité de problématiques tant fondamentales que finalisées. Il est donc important que la communauté se saisisse des approches d'éco-évolution, au-delà des seules questions d'évolution, pour comprendre la dynamique de la biodiversité.

## RÉFÉRENCES

- Bassar, R.D., Coulson, T., Travis, J. & Reznick, D.N. (2021). Towards a more precise - and accurate - view of eco-evolution. *Ecol. Lett.*, 24, 623-625.
- Blount, Z.D., Borland, C.Z. & Lenski, R.E. (2008). Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of *Escherichia coli*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 105, 7899-7906.
- Brown, J.H., Hall, C.A.S. & Sibly, R.M. (2018). Equal fitness paradigm explained by a trade-off between generation time and energy production rate. *Nat. Ecol. Evol.*, 2, 262+.
- Chitty, D. (1967). The natural selection of self-regulatory behaviour in animal populations. *Proc. Ecol. Soc. Aust.*, 51-78.
- DeLong, J.P., Forbes, V.E., Galic, N., Gibert, J.P., Laport, R.G., Phillips, J.S. et al. (2016). How fast is fast? Eco-evolutionary dynamics and rates of change in populations and phenotypes. *Ecol. Evol.*, 6, 573-581.
- Deshpande, J.N. & Fronhofer, E.A. (2022). Genetic architecture of dispersal and local adaptation drives accelerating range expansions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 119, 7.
- El-Sabaawi, R.W., Marshall, M.C., Bassar, R.D., Lopez-Sepulcre, A., Palkovacs, E.P. & Dalton, C. (2015). Assessing the effects of guppy life history evolution on nutrient recycling: from experiments to the field. *Freshw. Biol.*, 60, 590-601.
- Fussmann, G.F., Loreau, M. & Abrams, P.A. (2007). Eco-evolutionary dynamics of communities and ecosystems. *Funct. Ecol.*, 21, 465-477.
- Hendry, A.P. (2017). *Eco-evolutionary dynamics*. Princeton University Press.
- Hendry, A.P. & Kinnison, M.T. (1999). Perspective: The pace of modern life: Measuring rates of contemporary microevolution. *Evolution*, 53, 1637-1653.
- Hubbell, S.P. (2001). *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press.
- Huneman, P. (2019). How the Modern Synthesis Came to Ecology. *J. Hist. Biol.*, 52, 635-686.
- Kylafis, G. & Loreau, M. (2008). Ecological and evolutionary consequences of niche construction for its agent. *Ecol. Lett.*, 11, 1072-1081.
- Leibold, M.A., Holyoak, M., Mouquet, N., Amarasekare, P., Chase, J.M., Hoopes, M.F. et al. (2004). The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. *Ecol. Lett.*, 7, 601-613.
- Lion, S. (2018). Theoretical Approaches in Evolutionary Ecology: Environmental Feedback as a Unifying Perspective. *Am. Nat.*, 191, 21-44.
- Loreau, M. (2010). From populations to ecosystems: Theoretical foundations of a new ecological synthesis. Princeton University Press.
- MacArthur, R.H. & Wilson, E.O. (1967). *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press.
- Matthews, B., Narwani, A., Hausch, S., Nonaka, E., Peter, H., Yamamichi, M. et al. (2011). Toward an integration of evolutionary biology and ecosystem science. *Ecol. Lett.*, 14, 690-701.
- McPeck, M. (2017). *Evolutionary Community Eco*. Princeton University Press.
- Pausas, J.G. & Bond, W.J. (2022). Feedbacks in ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.*, 37, 637-644.
- Pelletier, F., Garant, D. & Hendry, A.P. (2009). Eco-evolutionary dynamics. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 364, 1483-1489.
- Pimentel, D. (1961). Animal population regulation by the genetic feedback mechanism. *Am. Nat.*, 95, 65-79.
- Post, D.M. & Palkovacs, E.P. (2009). Eco-evolutionary feedbacks in community and ecosystem ecology: interactions between the ecological theatre and the evolutionary play. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 364, 1629-1640.
- Vellend, M. (2010). Conceptual synthesis in community ecology. *Q. Rev. Biol.*, 85, 183-206.
- Wagner, A. (2011). *The origins of evolutionary innovations: A theory of transformative change in living systems*. Oxford University Press.
- Whitham, T.G., Bailey, J.K., Schweitzer, J.A., Shuster, S.M., Bangert, R.K., Leroy, C.J. et al. (2006). A framework for community and ecosystem genetics: from genes to ecosystems. *Nat. Rev. Genet.*, 7, 510-523.





Un orchis pyramida  
*Anacamptis pyramidalis*, au  
Pic Saint Loup dans l'Hérault.  
Ici, une abeille avec sur le dos  
du pollen appartenant à une  
autre espèce d'orchidée.  
Crédit : © Pierre GRECH/  
Bertrand SCHATZ/CNRS  
Images



Les  
**grands**  
**défis**  
environnementaux

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023

# Érosion de la biodiversité : de la perception à l'action

Auteurs : Caroline Habold (IPHC) ; Hervé Jactel (BIOGECO) ; Emmanuelle Porcher (CESCO)  
Contributeurs : cf page des références

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Caractériser avec précision la dynamique de la biodiversité dans le temps et l'espace en combinant l'usage d'outils méthodologiques traditionnels (taxinomie, savoirs locaux) et plus innovants (capteurs, IA)
- ▶ Renforcer les approches transdisciplinaires connectant sciences de l'environnement et sciences sociales, placer les socioécosystèmes au cœur des travaux et former les étudiants à ces approches et outils
- ▶ Co-construire les actions de conservation avec l'ensemble des acteurs, renforcer les terrains et objets de recherche communs (observatoires hommes-milieux (OHM), zones ateliers (ZA), *livings labs*), participer aux initiatives internationales

## Introduction

De nombreuses organisations (IPBES\*...) et publications scientifiques (Ceballos, Ehrlich & Dirzo, 2017 ; Ceballos *et al.*, 2015...) alertent sur l'érosion, voire l'effondrement, de la biodiversité. S'il existe un consensus scientifique solide quant à la magnitude et au sens des changements de biodiversité chez les groupes les mieux étudiés, essentiellement les vertébrés, des imprécisions demeurent pour d'autres groupes, comme en témoignent des méta-analyses sur le déclin des insectes (Desquilbet *et al.*, 2020 ; Dornelas & Daskalova, 2020 ; Outhwaite *et al.*, 2020 ; Hallmann *et al.*, 2017). Ces discussions émergent pour plusieurs raisons, telles que des rythmes et ampleurs variables de la disparition des populations, espèces, communautés et écosystèmes entre zones géographiques, milieux écologiques, périodes temporelles ou groupes taxinomiques. Elles sont aussi alimentées par le manque de données précises pour caractériser les changements de biodiversité pendant les quelques décennies ou siècles précédents. Pour mieux évaluer ces tendances, en discerner les causes, et pour mesurer l'efficacité des solutions d'atténuation, il est fondamental de disposer de méthodes fiables et robustes de caractérisation de la biodiversité, dans le temps et dans l'espace.

Face au constat de modifications profondes de la biodiversité au moins pour quelques groupes, plusieurs programmes de conservation de la biodiversité et de restauration des habitats ont été menés ces dernières décennies avec une contribution active des scientifiques. Ces programmes se sont attelés à la restauration active de paysages anciens et/ou à la réintroduction ou au renforcement de populations animales ou végé-

tales en danger d'extinction. Si ces actions de conservation semblent avoir souvent des effets positifs (Godet & Devictor, 2018), leur mise en œuvre est souvent considérée comme trop peu ambitieuse et il reste un grand nombre de questions en suspens pour améliorer leur efficacité. En amont de toute action, il est notamment indispensable de définir le(s) niveau(x) d'organisation à conserver, ainsi que le besoin et la durée d'interventions au sein de systèmes soumis à des sources de pressions multiples et évolutives.

Une attention particulière doit être portée aux socio-écosystèmes à forts enjeux économiques : dans ces socio-écosystèmes plus qu'ailleurs, les humains et les non-humains sont en interaction forte, et les conflits d'usage peuvent orienter significativement les efforts de conservation. Ces interrelations omniprésentes entre les humains, leurs organisations et le reste de la biodiversité appellent des travaux pour mieux comprendre les moteurs de changements, à différentes échelles, des individus aux organisations. Ils soulèvent des interrogations quant à la place que les scientifiques doivent prendre pour susciter ou accompagner ces changements.

L'atelier de prospectives CNRS Écologie & Environnement sur l'« Érosion de la biodiversité, de la perception à l'action », a organisé trois séances de discussion avec les scientifiques en écologie et environnement pour identifier les questions, verrous et solutions afférentes à la caractérisation et la conservation de la biodiversité. Ceux-ci sont présentés ci-dessous, comme une synthèse des contributions écrites et orales reçues à l'occasion de cet atelier.

---

## Vers une approche intégrative des suivis de biodiversité et des actions de conservation

S'il existe quelques consensus forts sur l'érosion, voire l'effondrement, de la biodiversité (Bronzizio *et al.*, 2019), et de nombreuses actions de conservation mises en œuvre pour contrer cette dégradation, souvent avec succès (Godet & Devictor, 2018), les suivis et mesures de conservation restent trop souvent focalisés sur une fraction de la biodiversité, tant en termes de diversité taxinomique, de niveaux d'organisation écologique, de temporalité, que des habitats concernés.

### Corriger les biais taxinomiques et considérer les différents niveaux d'organisation biologique et écologique

Tout d'abord, un constat partagé est la forte disparité d'études et de connaissances sur l'état de la biodiversité entre différents groupes taxinomiques, avec des taxons très suivis et de grand intérêt médiatique (ex. mammifères et oiseaux) et des groupes orphelins ou sous-étudiés, notamment ceux de taille microscopique (archées, protistes, bactéries, virus) ou très nombreux en espèces (insectes). De même, certains programmes de conservation concentrent leurs actions sur une ou quelques espèces végétales ou animales, souvent emblématiques, et/ou sur des habitats sensibles ou des milieux instables. Il existe donc toute une biodiversité « invisible »

non considérée par la conservation, pour différentes raisons (pas d'intérêt socio-économique, nuisible, cryptique...) et dont on ignore parfois tout de l'état des populations et de la biologie. Enfin, trop souvent les niveaux d'organisation du vivant (génétique, spécifique, fonctionnel) sont analysés séparément, avec des outils et méthodes différents, sur des pas de temps variables, mobilisant des disciplines peu enclines à croiser leurs données. Cela limite les capacités d'identification des espèces par combinaisons d'informations, de compréhension des mécanismes de réponse aux pressions, de prévision des dynamiques spatio-temporelles.

### Intégrer les échelles temporelles

La dynamique temporelle de la biodiversité soulève de nombreuses questions alors que sa connaissance est essentielle pour informer sur l'intensité et les causes de l'érosion de la biodiversité. La première question tient à la capacité de mesure au long cours de l'état de la biodiversité, nécessitant la mise en œuvre de méthodes standardisées et de protocoles appliqués sans rupture de continuité. Une autre question fondamentale est celle de la référence historique, qui permet de déterminer le sens et la magnitude des évolutions quantitatives. Elle est potentiellement entachée d'un biais connu comme étant le *shifting baseline syndrome* qui suppose que l'absence de définition d'un temps de référence empêche de mesurer correctement des tendances temporelles. Elle soulève également la question de l'utilisation de la référence historique comme un objectif à atteindre pour les actions de conservation, dans un monde en

changement rapide. Le même problème se pose pour l'évaluation de la résilience de la biodiversité aux perturbations. Une troisième question concerne l'utilisation de données historiques ou paléontologiques pour aider à interpréter les tendances actuelles. L'examen des crises passées peut donner des éclairages intéressants sur les conséquences des perturbations actuelles, à condition de raisonner par groupes fonctionnels ou phylogénétiques d'espèces.

### **Renforcer l'étude de la biodiversité dans des espaces parfois négligés**

Historiquement l'étude et la conservation de la biodiversité se sont focalisées sur des espaces considérés comme « naturels », avec une occupation humaine faible, voire inexistante (exemple de la création des premiers parcs naturels en France et ailleurs dans le monde). Or, les espaces à forte occupation humaine, et/ou dans lesquels se déploient les activités économiques des humains, représentent une surface importante, particulièrement dans les milieux terrestres, espaces agricoles et forestiers, zones de pêche en milieu marin, espaces urbains. Dans ces espaces, les non-humains coexistent

avec les humains depuis longtemps et leur dynamique est fortement influencée par les activités anthropiques, mais ceux-ci restent sous-étudiés par rapport aux espaces dits « naturels », et bénéficient beaucoup moins des actions de conservation. Les sciences de la conservation doivent donc se réappropriier aussi ces espaces, qui peuvent être également un lieu privilégié pour les approches interdisciplinaires nécessaires à la prise en compte des contextes juridiques, économiques, politiques (voir « Intégrer les humains et leur diversité dans la conservation de la biodiversité des socio-écosystèmes »).

### **Aboutir à des indicateurs de biodiversité reflétant ces intégrations taxinomiques, spatiales, écologiques et temporelles**

Devant la difficulté d'échantillonner ou d'identifier certains groupes taxinomiques, la science de la biodiversité a tôt fait de développer des indicateurs fondés sur des corrélations ou des valeurs de substitution (*correlates or surrogates*) qui ont le mérite de répondre de façon analogue aux pressions ou de faciliter l'appropriation des mesures et des suivis par les parties prenantes. Des variables de biodiversité essentielles (EBV\*) ont ainsi été proposées et continuent de faire l'objet de recherches théoriques et méthodologiques. Il convient sans doute de participer

à ces études afin de contribuer à l'effort international de normalisation et de fourniture de données à l'échelle globale. S'il existe désormais de nombreux outils mathématiques et écologiques pour caractériser les changements de biodiversité dans toutes leurs dimensions (forces, pressions, impacts, état, réponses), les sciences de la conservation peuvent encore être mobilisées pour que ces outils soient véritablement intégrés dans l'élaboration des politiques publiques, à l'égal des indicateurs économiques et sociaux.

## **Intégrer les humains et leur diversité dans la conservation de la biodiversité des socio-écosystèmes**

Les enjeux de conservation de la biodiversité sont régulièrement en conflit avec d'autres enjeux, par exemple économiques, dans les espaces occupés par des activités humaines. Un enjeu majeur des sciences de la conservation est de faire de la conservation de la biodiversité un objectif largement partagé dans les sociétés humaines, pour aboutir à une co-construction des actions de conservation impliquant toutes les parties prenantes, sans ignorer les conflits d'intérêt en jeu. Cela suppose de développer des projets de recherche pour (1) mieux comprendre le fonctionnement des humains, de l'échelle des individus aux sociétés, en interaction avec les non-humains (la « nature ») et (2) mettre en place les conditions d'une co-construction, entre le monde de la recherche et le reste de la société, des savoirs et des actions pour la conservation de la biodiversité.



---

## Mieux comprendre les interactions humains/non-humains et leurs conséquences pour les choix de conservation

### Relations individuelles à la nature

Les acteurs et actrices de la recherche tentent depuis longtemps de contribuer à des changements de comportement vis-à-vis de la nature par la formation et la diffusion de la connaissance. Cependant, les comportements individuels ne sont pas uniquement influencés par le niveau de connaissance, mais peuvent dépendre aussi, entre autres, de relations sensibles ou émotionnelles à la nature. Certains déterminants de ces relations particulières sont déjà connus, tels une connaissance intime du milieu et l'importance de l'attachement au territoire, des biais cognitifs incluant l'anthropomorphisme qui peut conduire à préférer certains groupes d'espèces pour les priorités de conservation, et le fait que ces relations sont très dynamiques. Face à l'érosion documentée de la relation des humains à la nature (notion d'« extinction de l'expérience » de nature) et aux conséquences qu'elle peut avoir sur les processus d'engagement en faveur de la conservation, la recherche doit s'atteler aux questions suivantes pour mieux comprendre les relations humains/nature et leurs impacts : quels sont les processus d'engagement des citoyens et citoyennes ? Quels sont les déterminants de la perception de la nature ? Comment s'articulent les processus individuels avec les dynamiques collectives ? Une proposition générale est de développer une anthropologie de la conservation, pour mieux comprendre comment les comportements humains sont à l'origine des choix de conservation, et aussi pour favoriser la conservation, via une encapacitation (*empowerment*) de l'ensemble des citoyens et des citoyennes pour que chacun puisse contribuer à la co-construction des choix de conservation.

### Analyser la place des organisations dans l'aménagement du territoire et la conservation de la biodiversité

Les impacts des humains sur la biodiversité ne sont pas uniquement la résultante d'une somme de comportements individuels, mais dépendent aussi du fonctionnement des organisations (acteurs publics, corps intermédiaires, acteurs privés...), qui ont un rôle majeur à jouer dans la transition, d'autant qu'elles peuvent avoir beaucoup d'impacts malgré des activités parfois

faiblement en lien avec la biodiversité. Il faut renforcer l'implication des sciences de gestion, psychosociologie des organisations ou sciences politiques pour analyser le fonctionnement de ces organisations et leurs impacts sur la biodiversité. Cela suppose, par exemple des travaux en sociologie, pour mieux comprendre la mise en œuvre des politiques visant la prise en compte de la biodiversité dans les secteurs d'activité à l'origine de sa dégradation, ou encore pour analyser le fonctionnement des organisations industrielles (« marchands de doute »). En droit, des réflexions sont nécessaires autour de l'attribution de droits à des entités écologiques, afin de contrebalancer une tradition d'appropriation et d'utilisation des non-humains par les humains, et la protection par l'intermédiaire des services écosystémiques, qui amplifie la réification de la nature.

### Les décideurs

Les enjeux de conservation sont souvent mal connus ou mal compris par les décideurs, qui doivent en outre gérer des conflits entre usages (activités économiques, usages citoyens, aires protégées...). L'influence du contexte institutionnel et organisationnel nuit à l'efficacité des politiques publiques de conservation (ex. de la compensation écologique au cas par cas vs. sites naturels de compensation). Les acteurs de la conservation manquent de marge de manœuvre et souffrent de la complexité des statuts et autres contraintes. Enfin, il existe un décalage entre le temps souvent long de la conservation et le temps court des politiques/décideurs. Afin d'améliorer les interactions entre décideurs et les autres acteurs de la conservation, et aboutir à la mise en œuvre de mesures de conservation et de gestion de la biodiversité plus efficaces, les chercheuses et chercheurs pourraient intervenir sur les points suivants :

- expliciter les objectifs de la conservation ;
- réaliser des approches par scénarios pour aider à la prise de décision ;
- utiliser des outils numériques dans le dialogue science-décideurs pour des objectifs de planification de la conservation (Justeau-Allaire *et al.*, 2021) ;
- proposer une gestion adaptative : suivre et évaluer la gestion pour réajuster les mesures prises.

**Les compensateurs**

Une partie des actions de conservation sont des mesures compensatoires suite à la destruction d'habitats d'espèces protégées. Ces mesures dépendent du contexte politique, de l'influence de lobbies et d'enjeux réglementaires. La voix des scientifiques est souvent secondaire ou sollicitée pour un accompagnement ponctuel à la conception et, parfois, à la réalisation de mesures compensatoires servant ainsi de caution scientifique. Les questions soulevées sont de savoir si et comment la compensation doit être mise en œuvre, et comment suivre les conséquences des actions de compensation. Il s'agit aussi de définir le rôle des scientifiques dans la compensation sachant que leur intervention permettrait des suivis sur un temps plus long, davantage protocolé et avec une vision spatiale globale. La mise en place d'un groupe de travail sur la compensation écologique, réunissant des chercheurs en sciences de l'environnement et sciences sociales, a été proposée afin de réfléchir à ces différents sujets.

**Étudier les valeurs de la biodiversité et les conséquences pour les stratégies de conservation**

Face à l'intrication des dynamiques humaines et non-humaines, plusieurs options s'offrent

pour concilier conservation de la biodiversité et fonctionnement des humains et de leurs organisations. Elles diffèrent notamment par un gradient d'organisation spatiale de la conservation de la biodiversité, et de degré d'interventionnisme pour la restauration des systèmes dégradés. Le gradient d'organisation spatiale couvre des propositions qui promeuvent l'utilisation d'une partie de la surface terrestre pour la dynamique de systèmes écologiques non-humains exclusivement (projet *Half-Earth*, réserves plus ou moins intégrales de biodiversité *land sparing* en agriculture, densification urbaine...) et à l'autre extrémité des approches d'écologie de la réconciliation (*land sharing* en agriculture). Le gradient d'interventionnisme va quant à lui d'approches avec un fort « jardinage » de la nature à des solutions fondées sur la nature impliquant très peu l'humain (libre évolution, laissez-faire, réensauvagement...). Ces différentes visions du fonctionnement et de la conservation de la biodiversité sont associées à des différences de valeurs attribuées à la biodiversité. Des recherches sont nécessaires pour comprendre quelles sont ces valeurs et comment elles sont associées ou non à des choix de conservation différents.

**Mettre en place les conditions d'une co-construction des savoirs et des actions pour la conservation de la biodiversité**

Une première réflexion concerne le rôle des scientifiques dans les actions de conservation, de la production de connaissances à l'aide à la décision. Les programmes de conservation doivent bénéficier d'une approche multi-partenariale qui réunit la société, les opérateurs de terrain, les pouvoirs publics, les financeurs et la recherche. Une réflexion a été menée pour définir les rôles, en particulier des scientifiques, et optimiser les interactions entre ces différents partenaires. Enfin, il s'agit de définir des cadres institutionnels qui permettront de co-construire les programmes de recherche et de partager la compréhension des incertitudes avec les actrices et acteurs des politiques de conservation. Plusieurs propositions ont été élaborées en réponse à ces questions.

**Poursuivre la participation active à la formation et la diffusion**

Dans une optique d'encapacitation des individus, il n'est pas inutile de rappeler que le monde de la recherche peut contribuer à l'action pour la conservation de la biodiversité en partageant les connaissances qu'il produit le plus largement possible. Les chercheuses et les chercheurs ont également un rôle de diplomatie scientifique, pour porter le savoir dans diverses organisations (exemple des formations proposées en 2022 aux nouveaux parlementaires par un collectif de climatologues et d'écologues). Cela passe par la participation à l'enseignement supérieur, dont les formations doivent être plus largement ouvertes aux enjeux environnementaux et de conservation de la biodiversité. D'autres arènes et d'autres

modes d'échanges peuvent et doivent être investis, tels que les fêtes de la nature et de la science, les terrains et territoires avec des projets de co-construction, où le partage des savoirs peut être bidirectionnel, ou les approches art-science.

### **Amplifier le développement des approches participatives**

Les approches participatives sont importantes pour créer du lien entre le monde de la recherche et la société civile, et renforcer la connaissance et les liens sensibles des participantes et participants. Elles prennent le nom de sciences participatives, recherche/action participative, sciences citoyennes... Elles sont proposées pour des territoires ruraux, pour les milieux côtiers, les océans, avec parfois une vocation explicite de conservation. C'est l'objet notamment de l'approche de conservation communautaire, qui souligne l'importance de prendre en compte les pratiques et les savoirs des populations humaines riveraines des zones à protéger, mais qui reste à mieux définir et mieux comprendre. Ces approches sont déjà largement promues à CNRS Écologie & Environnement et ailleurs, mais doivent continuer à être soutenues, notamment pour assurer leur maintien sur le long terme.

### **Prendre en compte les savoirs non-académiques et les savoirs locaux**

Les scientifiques reconnaissent volontiers que leurs études sur la biodiversité peuvent être biaisées par des partis pris culturels ou institutionnels. Les rapports de l'IPBES\* insistent sur

la nécessité de prendre en compte les savoirs naturalistes locaux pour ne pas négliger des connaissances empiriques utiles, voire élargir les inventaires à des groupes taxinomiques d'un intérêt culturel ou spirituel particulier pour les peuples autochtones. Dans les pays en développement, où les enjeux économiques peuvent être particulièrement prégnants, les approches coutumières, de l'héritage, de la culture locale doivent absolument être prises en compte et valorisées dans les programmes de conservation. Un frein à ces programmes proviendrait d'une vision occidentale de la conservation qui ne serait pas universellement partagée et comprise.

### **Établir des terrains et des objets de recherche et d'action communs**

Pour promouvoir la co-construction dans l'étude et la conservation de la biodiversité, plusieurs dispositifs ont déjà fait leur preuve et leur pérennité doit être assurée. En premier lieu, les terrains partagés, tels que les Zones Ateliers (ZA), les Observatoires Hommes-Milieux (OHM), les *living labs*, ou les sites d'étude en écologie globale, sont considérés comme des outils importants pour rétablir la confiance entre recherche et acteurs du territoire. D'autres lieux pour favoriser ces échanges sont les observatoires de la transition écologique, les aires protégées en zones à forte densité humaine ou les centres de culture et d'éducation scientifique. Enfin, la co-construction peut aussi se projeter dans le temps, avec des réflexions sur des futurs communs via des scénarios pour l'évaluation des risques environnementaux ou des projets de conservation de la biodiversité.

## **Principaux verrous et solutions proposées**

### **Les ressources, toujours les ressources**

#### **Temps courts et financements sur projet**

Analyser les changements de biodiversité et participer aux actions de conservation, en co-construction avec l'ensemble de la société, suppose des investissements sur le temps long, permettant le maintien de programmes de suivi de la biodiversité, la pérennité des observatoires comme les ZA ou

les OHM, et l'établissement de relations durables entre la recherche et les partenaires sur le terrain. Le fonctionnement actuel de la recherche, avec l'essentiel des financements obtenus par projet et la diminution de la part des personnels titulaires (idem IT), au profit de postes contractuels, ne favorise pas ces investissements sur le temps long. Des programmes de recherche sur le temps long

\* Glossaire

sont donc indispensables : on peut s'étonner par exemple qu'il n'existe encore aucun Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) centré sur la conservation de la biodiversité par un autre biais que ses valeurs instrumentales (PEPR Solu-BioD, solutions basées sur la nature).

#### **Outils et compétences pour l'étude de la biodiversité encore « invisible »**

Un verrou important pour la caractérisation de la biodiversité concerne la perte d'expertise en taxinomie. Plusieurs solutions existent pour lever ce verrou. Au-delà d'un nécessaire renforcement de la formation, pour acquérir les compétences taxinomiques sur les groupes sous-étudiés, il faut promouvoir les démarches de sciences participatives avec notamment la généralisation de l'identification assistée par ordinateur (ex. Xper3\*) ou d'outils de reconnaissance assistée (ex. applications smartphone utilisant l'intelligence artificielle comme PlantNet®). De façon générale, de nombreuses technologies nouvelles semblent mobilisables pour mieux caractériser la biodiversité. Elles permettent notamment l'acquisition de données en plus grand nombre et plus précises à l'aide de nouveaux types de capteurs (ADN, images, sons, odeurs...) et leur analyse plus fine (ex. pipelines de métagénomique) ou plus puissante grâce aux algorithmes d'intelligence artificielle. Elles offrent donc des perspectives majeures de progrès pour le *monitoring* de groupes taxinomiques difficiles à échantillonner ou identifier. Un verrou important à leur application demeure néanmoins l'existence de bases de références permettant de relier les données multiples aux espèces correspondantes, associée à une maintenance et un partage de ces bases de données. Un investissement dans la science de l'informatique devrait donc être consenti pour accompagner ces avancées technologiques.

Des recherches méthodologiques semblent également nécessaires pour consolider les *monitorings* à long terme de la biodiversité. Les infrastructures

de type observatoire ou zone atelier apparaissent alors comme très pertinentes pour le déploiement de ces suivis en continu car elles offrent des conditions optimales de maintien des capacités d'inventaires et permettent la mesure de nombreuses covariables (conditions environnementales, actions de gestion...) utiles pour l'interprétation des tendances temporelles. Là encore elles doivent être maintenues sur le long terme.

Enfin, l'inégalité de couverture des différents types d'habitats constitue un verrou important dans notre connaissance de la dynamique de la biodiversité à l'échelle du territoire et nous prive d'options d'analyse des pressions exercées, notamment en relation avec les activités anthropiques. Deux espaces émergent comme devant faire l'objet d'une attention particulière. Le premier est celui des milieux agricoles car il combine les pressions majeures sur la biodiversité avec le changement d'utilisation des terres et la fragmentation des paysages, l'utilisation de pesticides, et l'arrivée d'espèces invasives. Il est actuellement au centre d'actions transformatives avec la mise en œuvre de mesures agro-écologiques. Il pourrait donc constituer un terrain propice aux suivis de dynamique de la biodiversité en réponse aux pressions mais aussi à l'action des leviers d'atténuation. Le deuxième type d'espaces d'intérêt émergent est constitué des zones urbaines et péri-urbaines. Ces espaces concentrent en effet la majorité de la population humaine, permettant à la fois de mieux tester l'effet des pressions anthropiques sur la biodiversité mais aussi de mobiliser l'attention des citoyens sur les enjeux de sa préservation. Ils constituent en outre des laboratoires à ciel ouvert de l'influence des changements climatiques sur le vivant (avec des conditions plus drastiques qui préfigurent les changements à venir) et des ruptures de connectivité. Une concentration des efforts de recherche dans une approche pluri- et transdisciplinaire sur le milieu urbain pourrait donc permettre des avancées majeures dans les études de dynamique de la biodiversité

#### **Développer l'interdisciplinarité dans toutes les dimensions pour mieux comprendre le fonctionnement de systèmes complexes**

L'étude des socio-écosystèmes dans toute leur complexité, et l'identification des stratégies de conservation les plus efficaces, supposent de

réussir à faire travailler ensemble des scientifiques de disciplines différentes, couvrant les sciences du vivant (biologie, écologie, évolution,

paléontologie...), les sciences de l'environnement (climatologie, pédologie, océanographie, géochimie...) et les sciences sociales (anthropologie, ethnologie, sociologie, sciences politiques, droit de l'environnement, économie...). Or, bien qu'elle soit appelée de ses vœux depuis longtemps par tous les établissements de recherche, dont CNRS Écologie & Environnement au premier chef, l'interdisciplinarité ne va pas de soi, ce qui constitue un verrou majeur.

### **Renforcer l'interdisciplinarité au sein des sciences du vivant**

Un verrou pour la caractérisation de la biodiversité est que les différents niveaux de diversité, génétique, spécifique, fonctionnelle sont trop souvent étudiés séparément. En parallèle, ou peut-être en conséquence, les approches de conservation peuvent être parfois fixistes à l'échelle temporelle et spatiale et la dynamique des systèmes n'est pas assez considérée (Robert *et al.*, 2017). Enfin, les sources de pression sur ces milieux elles-mêmes évoluent au cours du temps (changement climatique, pollution...) et peuvent entraîner le développement d'espèces mieux adaptées qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les actions de conservation. Ces limites peuvent être dépassées par le développement d'approches de taxinomie intégrative, combinant l'analyse de caractéristiques moléculaires, morphologiques et écologiques et mobilisant donc plusieurs disciplines comme la phylogénie, la biologie moléculaire et l'écologie des communautés. Cela devrait en outre permettre de déceler des interdépendances entre niveaux de diversité, pouvant servir de *proxy* pour la caractérisation de la biodiversité de groupes taxinomiques difficiles à identifier et aider à considérer conjointement la diversité structurelle et fonctionnelle. De plus, la conservation doit compléter une vision traditionnellement objet-centré (conserver les populations, les espèces ou les habitats) par une vision intégrant les processus écologiques et évolutifs. Par exemple, il peut s'agir de travailler à la conservation de la connectivité ou des continuités dans l'espace et dans le temps ; il faut notamment considérer les continuums terres/mers et mers/terres, les actions sur les uns pouvant impacter les actions sur les autres. D'autres propositions incluent la redéfinition des critères d'évaluation du risque environnemental pour évaluer les niveaux de perturbation à l'échelle écosystémique,

l'évaluation du cumul des facteurs de pression, ou encore la combinaison d'actions immédiates (ex. renforcement d'une population) avec des projets de plus long terme (restauration de l'habitat) intégrant les différentes échelles spatio-temporelles. Un dernier verrou subsisterait cependant, lié au décalage entre les actions de conservation et le temps de réponse des écosystèmes.

La question de la référence passée comme point de départ des trajectoires d'érosion de la biodiversité reste un verrou important tant du point de vue théorique que méthodologique. Des recherches sur le concept d'état ou seuil de référence et le développement de tests de sensibilité appropriés paraissent donc nécessaires pour aplanir ces difficultés. L'utilisation des collections de muséums pourrait se révéler utile pour établir des références en termes d'assemblages passés d'espèces. Des approches pluridisciplinaires réunissant paléontologues, archéologues, généticiens et écologues pourraient permettre de valider des modèles de dynamique temporelle de la biodiversité, après les crises du passé, qui seraient ensuite utilisés pour réaliser des projections de recouvrement de la biodiversité après des perturbations contemporaines ou selon des scénarios de changements climatiques ou de gestion.

### **Promouvoir l'interdisciplinarité « radicale » entre sciences du vivant, sciences de l'environnement et sciences humaines et sociales**

L'intérêt des missions et des dispositifs déjà en place (MITI\*, OSU\*, Fédérations de recherche...) est reconnu et ils doivent bien sûr être maintenus, mais des solutions complémentaires ont été proposées :

- soutenir les approches disciplinaires travaillant sur la relation des humains à la nature (anthropologie, sociologie...), qui peut être favorisé par des recrutements au sein de CNRS Écologie & Environnement, mais aussi par un renforcement des liens avec d'autres instituts (CNRS Sciences humaines et sociales notamment) ;
- poursuivre et renforcer les liens avec les sciences dites « dures » : les sciences de la durabilité par exemple ont assez peu intégré la biodiversité et sa dynamique ;
- promouvoir l'interdisciplinarité « individuelle », via des formations pluridisciplinaires adaptées, alliant sciences de l'environnement

et sciences sociales. Ces formations peuvent être des formations initiales, mais il faudra alors valoriser ces formations pour qu'elles ne soient pas vécues comme un obstacle pour les jeunes chercheuses et chercheurs, et ne le soient pas effectivement pour la poursuite de leur carrière scientifiques. L'interdisciplinarité individuelle peut aussi être atteinte via des conversions en cours de carrière, potentiellement moins risquées ;

- promouvoir l'interdisciplinarité collective, ce qui nécessite plusieurs prérequis. Il faut tout d'abord favoriser l'appropriation des fondamentaux et de la sémantique des autres disciplines par la formation interne (école thématiques, ateliers réguliers pour les novices pour contrebalancer la tendance à l'hyperspécialisation disciplinaire...), la co-construction de projets ou le partage, des terrains communs, qui permettent aussi bien le travail entre disciplines scientifiques que les échanges avec les occu-

pants des territoires, à l'image des Zones Ateliers (ZA) et Observatoires Hommes-Milieus (OHM). Une telle acculturation croisée des scientifiques, permettrait par exemple de nuancer la notion d'« acceptabilité » d'une mesure de conservation : il ne s'agit pas de faire passer une pilule auprès d'une population (humaine) mais bien d'encapaciter les individus pour qu'ils puissent prendre les décisions les plus éclairées possibles. Il faut enfin du temps pour que cette acculturation et co-construction se mettent en place : pour éviter de sauter les étapes, mieux vaut financer des projets pluridisciplinaires qui peuvent déboucher sur un travail véritablement interdisciplinaire à terme.

Ces réflexions appellent à accélérer la transition du CNRS pour ne pas localiser l'interdisciplinarité uniquement au sein des Commissions inter-disciplinaires (CID), mais l'intégrer au sein des sections de recherche.

### **Construire une communauté de recherche en sciences de la conservation**

Si CNRS Écologie & Environnement s'est depuis longtemps positionné comme structure de référence sur la recherche fondamentale en écologie et évolution, dont l'importance n'est pas à remettre en cause, il joue un rôle beaucoup plus modeste dans le pilotage des grands programmes de conservation. De plus, certaines actions de recherche ne sont pas éligibles à des appels à projets car elles n'apportent pas de solutions concrètes immédiates. Ce déficit d'affichage franc soulève la question de comment faire de la conservation un objet de recherche à part entière au-delà des aspects opérationnels, et d'identifier les questions scientifiques qui font débat dans la communauté des chercheurs qui travaillent dans la conservation. L'objectif à terme serait de constituer une communauté de recherche bien identifiée en sciences de la conservation et de comprendre pour cela quelles sont les implications de passer d'une étude d'objets de connaissance à l'étude d'objets de gestion. Un moyen possible de constituer une telle communauté serait via la constitution d'une section interdisciplinaire ou d'une CID CNRS autour des sciences de la conservation de la biodiversité.

La constitution d'une telle communauté de recherche suppose de lever un verrou lié au manque de réflexivité d'une partie des chercheurs sur leurs travaux et leurs implications. Des formations sur les points suivants pourraient être utiles :

- responsabilité sociale et posture des scientifiques : qu'est-ce qu'une recherche impliquée, les chercheurs doivent-ils « transformer » les individus ou la société ? Peut-on être à la fois scientifiques et militants ? Les chercheurs doivent-ils uniquement produire de la connaissance ou aussi fournir un appui aux politiques publiques ?
- Comment aborder de façon informée la co-construction de programmes de recherche ou de conservation avec différents types de partenaires (entreprises privés, pouvoirs publics, corps intermédiaires...) avec des intérêts parfois divergents ? Par exemple, comment éviter d'alimenter des stratégies comme la « fabrique de l'ignorance » (Proctor & Schiebinger, 2008) ?
- Comment évaluer l'impact de nos propres activités sur l'environnement et la biodiversité, et éviter les « déchets de la recherche » (Purgar, Klanjscek & Culina, 2022) ?



---

## Conclusions

Cet atelier a abouti à la formulation de propositions clés, à la fois scientifiques et méthodologiques, visant à mieux caractériser les changements de biodiversité et améliorer les actions de conservation.

Ainsi, afin de mieux caractériser la biodiversité au cours du temps et dans l'espace, il est indispensable de disposer d'outils méthodologiques robustes, fiables et universels. Si les nouvelles technologies (métagénomique, intelligence artificielle) peuvent être mobilisées, il ne faut pas négliger les savoirs plus « traditionnels » tels que l'identification des espèces, et former les étudiants à ces méthodologies. Les différents taxons seront ainsi considérés, de même que les différents niveaux de diversité, génétique, spécifique et fonctionnelle et les relations entre ces différents niveaux. Une réflexion doit aussi être menée concernant la prise en compte des savoirs naturalistes locaux, grâce notamment à la participation des sciences sociales aux programmes de recherche sur l'évolution de la biodiversité.

Des recherches méthodologiques sont également nécessaires pour suivre la dynamique de la biodiversité sur le long terme. Les observatoires et zones ateliers sont des outils pertinents pour étudier cette évolution, sous l'effet des pressions mais aussi en réponse aux actions de conservation. Certains habitats devront faire l'objet d'une attention particulière, notamment ceux concentrant les pressions anthropiques (milieu agricole, marin, urbain...) et où les enjeux environnementaux peuvent entrer en conflit avec les enjeux économiques et sociétaux. Enfin, l'utilisation de références historiques permettront d'apporter des éclairages sur les perturbations actuelles voire de réaliser des projections de l'évolution de la biodiversité

en réponse à des scénarios de changements climatiques ou des actions de conservation.

Un autre thème abordé dans le cadre de cet atelier concerne l'étude des relations humains-nature et l'intégration de la biodiversité dans le fonctionnement des organisations humaines. Les échanges ont porté sur la nécessité de renforcer les approches pluri- et interdisciplinaires en connectant sciences de l'environnement et sciences sociales et de placer les socioécosystèmes au cœur des travaux. Il s'agirait aussi de développer une anthropologie de la conservation afin de comprendre et de promouvoir la conservation et de renforcer l'implication des populations locales (sciences participatives). La question de la formation des étudiants à ces approches interdisciplinaires « vraies » s'est posée, de même que le recrutement et l'évaluation des chercheurs, avec la proposition de création d'une nouvelle section interdisciplinaire. Enfin, la réflexion a porté plus largement sur la place de la recherche dans la conservation, entre la production de savoirs et l'aide à la décision. Le temps long des actions de recherche et les enjeux de compréhension des mécanismes par les chercheurs sont souvent incompatibles avec les urgences et les contraintes des politiques. Il est donc indispensable que les chercheurs explicitent les objectifs et co-construisent les actions de conservation avec les différents acteurs, en intégrant les différents enjeux (environnementaux, économiques, politiques, règlementaires, sociétaux...). Afin de poursuivre ces actions et suivis sur le long terme, les chercheurs devront bénéficier de moyens pérennes et d'infrastructures de recherche renforcées (réseaux thématiques...), mais aussi participer aux initiatives internationales.

## RÉFÉRENCES

- Brondizio, E.S., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H.T. (2019). IPBES: Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany: IPBES secretariat. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., Garcia, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M. (2015). Accelerated Modern Human-Induced Species Losses: Entering the Sixth Mass Extinction. *Sci. Adv.* 1 (5): e1400253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Dirzo, R. (2017). Biological Annihilation via the Ongoing Sixth Mass Extinction Signaled by Vertebrate Population Losses and Declines. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114 (30): E6089-96. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>.
- Desquilbet, M., Gaume, L., Grippa, M., Cereghino, R., Humbert, J.-F., Bonmatin, J.-M., et al. (2020). Comment on "Meta-Analysis Reveals Declines in Terrestrial but Increases in Freshwater Insect Abundances". *Science* 370 (6523). <https://doi.org/10.1126/science.abd8947>.
- Domelas, M., Daskalova, G.N. (2020). Nuanced Changes in Insect Abundance. *Science* 368 (6489): 368-69. <https://doi.org/10.1126/science.abb6861>.
- Godet, L., Devictor, V. (2018). What Conservation Does. *Trends Ecol. Evol.* 33 (10): 720-30. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.07.004>.
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., et al. (2017). More than 75 Percent Decline over 27 Years in Total Flying Insect Biomass in Protected Areas. *PLoS One* 12 (10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>.
- Justeau-Allaire, D., Vieilledent, G., Rinck, N., Vismara, P., Lorca, X., Birnbaum, P. (2021). Constrained Optimization of Landscape Indices in Conservation Planning to Support Ecological Restoration in New Caledonia. *J. Appl. Ecol.* 58 (4): 744-54. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13803>.
- Outhwaite, C.L., Gregory, R.D., Chandler, R.E., Collen, B., Isaac, N.J.B. (2020). Complex Long-Term Biodiversity Change among Invertebrates, Bryophytes and Lichens. *Nat. Ecol. Evol.* 4 (3): 384+. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1111-z>.
- Proctor, R., Schiebinger, L. (2008). *Agnotology: The Making and Unmaking of Ignorance*. Stanford University Press, 312 pages.
- Purgar, M., Klanjscek, T., Culina, A. (2022). Quantifying Research Waste in Ecology. *Nat. Ecol. Evol.* 6 (9): 1390-97. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01820-0>.
- Robert, A., Fontaine, C., Veron, S., Monnet, A.C., Legrand, M., Clavel, J., et al. (2017). Fixism and conservation science. *Conserv. Biol.* 31 (4): 781-88. <https://doi.org/10.1111/cobi.12876>.

### Contributions écrites :

Guillaume Achaz (CIRB) ; Elisabeth Allain (GEOLAB) ; Julien Azuara (LIVE) ; Lory-Anne Baker (LMGE) ; Pierre Batteau (Aix-Marseille Université) ; Aude Beauger (GEOLAB) ; Nadia Belaidi (EA) ; Emna Ben Lamine (ECOSEAS) ; David Biron (LMGE) ; Anne-Kristel Bittebière (LEHNA) ; Sylvie Blangy (CEFE) ; Jean-Renaud Boisserie (PALEVOPRIM) ; Isabelle Bonnard (CRIOBE) ; Pierre Bonnet (AMAP) ; Agnès Bouchez (CARRTEL) ; Nathalie Boutin (AMU) ; Celine Brossard (ECOSEAS) ; Simona Bussotti (ECOSEAS) ; Joachim Claudet (CRIOBE) ; Eric Clua (CRIOBE) ; Groupe de Travail sur la Conservation communautaire ; Alix Cosquer (CEFE) ; Jean-Michel Cottalorda (ECOSEAS) ; Cédric Courson (CRI) ; François Criscuolo (IPHC) ; Colombar De Vargas (Tara GOSEE) ; Thibaud Decaëns (CEFE) ; Guillaume Decocq (EDYSAN) ; Benoit Deruard (ECOSEAS) ; Eugenio Di Franco (ECOSEAS) ; Gilles Didier (CR2P) ; Richard Dumez (EA) ; Marine Durocher (ISEM) ; François Dusoulier (MNHN) ; Thierry Dutoit (IMBE) ; Luc Ector (ERIN-OCEB, Luxembourg) ; Damien Ertlen (LIVE) ; Jean-Yves Georges (IPHC) ; Sandrine Grouard (AASPE) ; Paolo Guidetti (Stazione Zoologica Anton Dohrn - Italie) ; Fanny Guillet (CESCO) ; François Guyot (IMPMC) ; Thomas Haevermans (ISYEB) ; Daniel Helmer (Archéorient) ; Elisabeth Herniou (IRBI) ; Pierre-Alexis Herrault (LIVE) ; Sylvie Houte (CEBC) ; Laetitia Hedouin (CRIOBE) ; Alexis Joly (LIRMM) ; Joon Kwon (MIA) ; Michel Laurin (CR2P) ; Pascal Lazure (LOPS) ; Yvan Le Bras (PATRINAT) ; Guillaume Lecointre (ISEB) ; Joséphine Leflaive (EcoLab) ; Maya Leroy (MRM) ; Carlos Lopez-Vaamonde (URZF) ; Françoise Loques (ECOSEAS) ; Antoine Levêque (OFB-MNHN) ; Eric Maire (LIVE) ; Roland Marmeisse (ISYEB) ; Marjan Mashkour (AASPE) ; François Massol (Université de Lille) ; Hélène Melin (Clersé) ; Isabelle Michallet (EVS) ; Suzanne Mills (CRIOBE) ; Aurélien Miralles (ISEB) ; Xavier Morin (CEFE) ; Victor Narat (EA) ; Maggy Nugues (CRIOBE) ; Valeriano Parravicini (CRIOBE) ; Roseli Pellens (ISYEB) ; Sylvain Pincebourde (IRBI) ; Serge Planes (CRIOBE) ; Adélie Pomade (AMURE) ; François Pompanon (LECA) ; Karine Prince (CESCO) ; Yves Quere (Open Factory) ; Claire Rambeau (LIVE) ; Michel Raymond (ISEM) ; Richard Raymond (EA) ; Esther Regnier (AMURE) ; David Renault (ECOBIO) ; Stéphane Reynaud (LECA) ; Frédéric Rimet (CARRTEL) ; Gilbers Romero (ECOSEAS) ; Francesca Rossi (ECOSEAS) ; Rodolphe Rougerie (ISEB) ; Paul Rouveyrol (PATRINAT) ; Marie Roue (EA) ; Ana Ruiz-Frau (Institut Mediterrani d'Estudis Avancats - Espagne) ; Ferréol Salomon (LIVE) ; Pierre Sasal (CRIOBE) ; Jean-Claude Streito (CBGP) ; Wilfried Thuiller (LECA) ; Noémie Tomadini (AASPE) ; Jessica Tressou (MIA) ; Emmanuelle Vila (Archéorient) ; Olivier Voldoire (GEOLAB) ; Carlos Wetzel (ERIN-OCEB, Luxembourg) ; Lucie Zinger (IBENS) ; Aurélie Zwang (CEFE).

# Pollution & écosystèmes

Auteurs : Aurélie Cebron (LIEC), Clémentine Fritsch (Chrono-Environnement), Pierre Labadie (EPOC)

Contributeurs : Sandrine Charles (LBBE), Elisabeth Gross (LIEC), Soizic Morin (EABX), Ika Paul-Pont (LEMAR), Stéphane Pesce (RiverLy), Freddie-Jeanne Richard (EBI), Davide Vignati (LIEC), Claudia Wiegand (ECOBIO)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Développer les concepts « d'éco-exposome » et de « méta-écotoxicologie » pour mieux comprendre les impacts de la pollution
- ▶ Améliorer la prise en compte des effets des contaminants sur les réseaux d'interaction écologiques dans un contexte de stressseurs multiples pour prédire les effets en cascade sur les dynamiques de populations et les fonctions écosystémiques
- ▶ Développer la bancarisation d'échantillons, l'observation pérenne et la modélisation

## État des lieux

### La problématique « pollution et écosystèmes » : éléments clés et grands enjeux

La pollution chimique constitue une des neuf « limites planétaires », seuils à ne pas dépasser pour ne pas compromettre l'habitabilité de la planète (Persson *et al.*, 2022). Outre la dispersion de produits chimiques existants dans la nature, les humains sont également responsables de la synthèse de plus de 140 000 produits chimiques et de nouvelles substances sont continuellement créées (Naidu *et al.*, 2021) ; leur production a ainsi été multipliée par deux entre 2000 et 2017 (Persson *et al.*, 2022).

La perte considérable de biodiversité à l'échelle mondiale est établie, avec 25 % des espèces d'animaux et de végétaux estimés menacés, affectant la santé des écosystèmes et altérant le fonctionnement des processus écologiques ; les activités anthropiques sont considérées comme une cause d'extinction d'un nombre d'espèces sans précédent (IPBES\*, 2019). La pollution de l'air, de l'eau et du sol par une large gamme de polluants est désormais reconnue comme l'une des menaces majeures pour la conservation de la biodiversité avec les changements d'occupation des sols, les changements climatiques, la surexploitation des ressources et les espèces exotiques envahissantes (Bonebrake *et al.*, 2019 ; Bernhardt *et al.*, 2017 ; Groh *et al.*, 2022 ; IPBES, 2019).

Les organismes vivants sont exposés à des mélanges chimiques complexes (Scholz *et al.*, 2022) et à des facteurs de stress multiples (biotiques et abiotiques), dont les variations climatiques dues au changement global. Appréhender l'exposition des organismes à différents facteurs de risque, de manière la plus exhaustive possible, et établir les liens avec d'éventuels impacts demeurent des défis majeurs. Pour aider à prédire les risques associés à ces expositions multiples, le concept d'exposome a initialement été introduit dans le domaine médical, et défini comme la totalité des expositions auxquelles un individu est soumis durant son existence (Wild, 2005). Appliqué aux humains, ce concept introduit ainsi une

dimension temporelle et propose une vision intégrative des stress, incluant l'environnement chimique, microbiologique ou physique, le style de vie, l'alimentation et les infections (Escher *et al.*, 2017 ; Barouki, 2020). En complément, l'« éco-exposome » apporterait une vision intégrée et bidirectionnelle de la santé des écosystèmes et de la santé humaine (Barouki, 2020). Scholz *et al.* (2022) ont récemment proposé une définition alternative de l'éco-exposome, qu'ils ont restreint à la totalité de l'exposition interne à l'échelle de la vie d'un organisme : substances chimiques anthropiques et naturelles, leurs produits de biotransformation ou leurs adduits, et molécules de signalisation induites par l'exposition à un toxique ou ses métabolites. Il s'agit ici de prendre en compte non seulement l'exposition, mais aussi la fraction internalisée des contaminants (*i.e.* la plus susceptible d'induire des effets indésirables).

Les impacts des multiples facteurs de stress sur la biodiversité demeurent mal compris et sont difficiles à prévoir car l'exposition, la sensibilité et l'adaptabilité à un facteur donné peuvent être modifiées par les effets d'autres facteurs et leurs interactions (Vinebrooke *et al.*, 2004). Leur prise en compte requiert de développer de nouveaux concepts et de renouveler nos approches pour améliorer notre compréhension des mécanismes sous-jacents (Naidu *et al.*, 2021 ; Scholz *et al.*, 2022). Ces impacts résultent d'effets toxiques directs et d'effets indirects liés à des mécanismes écologiques difficiles à démêler et à quantifier. Les besoins de connaissances impliquent notamment l'étude de compartiments de la biodiversité encore peu explorés, d'interactions mal quantifiées, et de fonctions ou processus émergents peu connus. En effet, des réseaux écologiques complexes gouvernent le fonctionnement et la vulnérabilité des écosystèmes (Seibold *et al.*, 2018). Les études sur l'impact direct des polluants sont nombreuses, pourtant elles nécessitent encore d'être développées pour un grand nombre de taxons et d'être élargies en termes de descripteurs (Saaristo *et al.*, 2018). Les effets

indirects sont souvent non prévisibles (Bruder *et al.*, 2019) car les interactions biotiques sont peu prises en compte actuellement. Les facteurs de stress peuvent conduire à des changements de trajectoire d'un écosystème : d'un état stable stationnaire (eubiose), l'écosystème affecté pourrait se retrouver dans un état altéré propice à une dysbiose (Rosenfeld, 2017 ; Duperron *et al.*, 2020). Les différents microbiomes (pathogènes ou bénéfiques) sont interconnectés et peuvent expliquer ces changements écosystémiques (Sanerjee & Van Der Heijden, 2022), mais ces travaux restent émergents. Les recherches doivent se poursuivre pour évaluer plus précisément les rétroactions positives et négatives induites par l'adaptation des organismes aux polluants. Des fonctions d'intérêt (ex. en bioremédiation ; Kour *et al.*, 2021) peuvent apparaître mais des compromis fonctionnels difficiles à prévoir peuvent aussi affecter le fonctionnement de l'écosystème (Medina *et al.*, 2007).

L'aspect planétaire des pollutions implique des enjeux de transferts entre compartiments, trans-écosystèmes et trans-frontières des contaminations et de leurs impacts (Groh *et al.*, 2022). Leur étude est centrale pour caractériser et quantifier des processus qui déterminent le fonctionnement des écosystèmes soumis aux pressions anthropiques, de l'échelle locale à l'échelle globale. Or, nos connaissances restent fragmentaires et certains flux ainsi que leurs conséquences écotoxicologiques sont peu étudiés (Kraus *et al.*, 2021). Le concept de méta-écosystème a émergé depuis quelques décennies mais les approches intégrant écotoxicologie et macro-écologie sont peu développées (Beketov & Liess, 2012, Orr *et al.*, 2020). Les connexions et l'interdépendance entre compartiments d'un écosystème ou entre écosystèmes impliquent des enjeux liés à la caractérisation des dynamiques spatio-temporelles de contamination et d'impacts. Connaissances d'autant plus essentielles dans le contexte actuel des changements globaux où la pollution est étroitement liée à d'autres facteurs de pression et

où la surveillance de la biodiversité n'inclut que rarement les problématiques écotoxicologiques (Groh *et al.*, 2022).

Les concepts *One Health* et *Eco-Health* décrivent l'interdépendance entre la santé humaine, animale et environnementale ; ils constituent des cadres essentiels dans les-quels nos recherches doivent s'inscrire pour appréhender les répercussions systémiques de la pollution et des différents facteurs de stress (Destoumieux-Garzón *et al.*, 2018). Le rythme de production/émission de polluants et de synthèse de nouveaux composés dépasse désormais les capacités d'évaluation des risques et de surveillance, ce qui représente des défis pratiques et économiques (Gilbert, 2011 ; Hartung & Rovida, 2009 ; Persson *et al.*, 2022). Les procédures d'évaluation du risque environnemental ne permettent pas toujours d'assurer leurs objectifs de protection et sont critiquées (Brühl & Zaller, 2019 ; Topping *et al.*, 2020). La surveillance combinée des pollutions, de l'exposition et des réponses des organismes *in natura* est peu implémentée alors qu'elle serait nécessaire pour détecter les impacts et estimer les effets des mesures de gestion (Ankley *et al.*, 2021 ; Vijver *et al.*, 2017).

L'IPBES (2019) souligne que « *les trajectoires actuelles ne permettent pas d'atteindre les objectifs de conservation et d'exploitation durable de la nature* » et « *des changements en profondeur sur les plans économique, social, politique et technologique* » seraient nécessaires. Les pollutions doivent être considérées dans leur contexte socio-écosystémique pour appréhender les différents processus en jeu. Une approche globale des impacts anthropiques sur l'environnement reste à structurer, en termes de recherche et gouvernance. Ainsi, la mise en œuvre de nouvelles stratégies systémiques intégrées et transdisciplinaires s'avère indispensable à la compréhension de la résistance et de la résilience des écosystèmes.

### Synthèse des contributions et participations à l'atelier

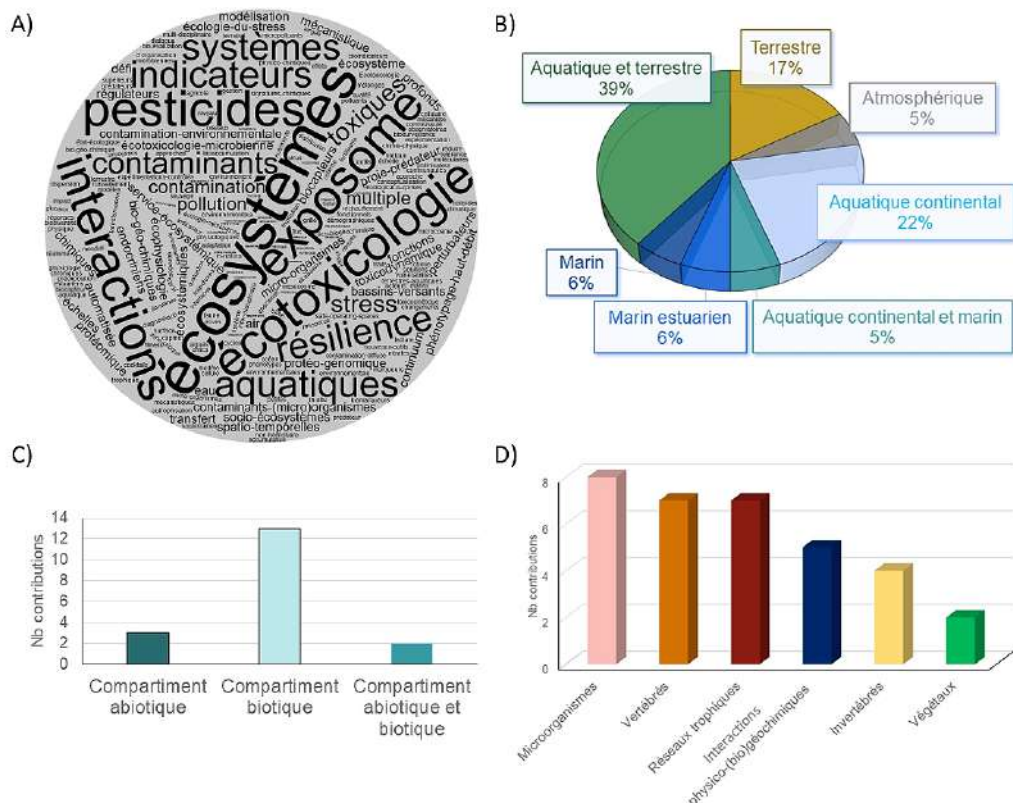
Seize contributions ont été proposées, émanant de nombreux acteurs de la communauté scientifique avec une bonne couverture du territoire métropolitain. Ces contributions ciblent un large panel de contaminants, allant des métaux aux plastiques et nanoparticules tout en incluant des polluants organiques persistants, des pesticides et des contaminants organiques d'intérêt émergent. Elles proposent des approches empiriques, théoriques et de modélisation.

Le panorama des contributions (Figure 1) met en lumière la diversité des questionnements sur la problématique « pollution et écosystèmes ». Il illustre également la diversité des recherches en termes d'écosystèmes, de compartiments, de sources, de types de contaminants, de modèles biologiques et d'échelles spatiales. Cette multiplicité offre une opportunité pour :

- développer des questionnements et outils transversaux ;
- aborder les interactions entre compartiments et entre écosystèmes en considérant une large diversité de contaminants et leurs éventuelles interactions.

Les contributions abordent une large gamme de questions et d'approches (Figure 2) et se rejoignent dans leurs thématiques scientifiques comme l'illustre la récurrence de certains mots-clés : fonctionnement et résilience des systèmes face aux pollutions et aux facteurs de stress multiples, transferts de contaminants, impacts toxiques, écophysiologiques et sur les réseaux trophiques, indicateurs de contamination et d'effets. Des thèmes fédérateurs se dégagent : exposome, biodiversité, changements d'échelles/continuum, changements globaux, socio-écosystèmes, ainsi que des outils transversaux : surveillance/observation, expérimentation, modélisation, outils omiques et de diagnostic.

**Figure 1.**  
Panorama des contributions :  
A) nuage de mots sur les titres et mots-clés des contributions ;  
B) répartition par type d'écosystème ;  
C) nombre (Nb) de contributions par compartiment ;  
D) nombre (Nb) de contributions par modèle d'étude.





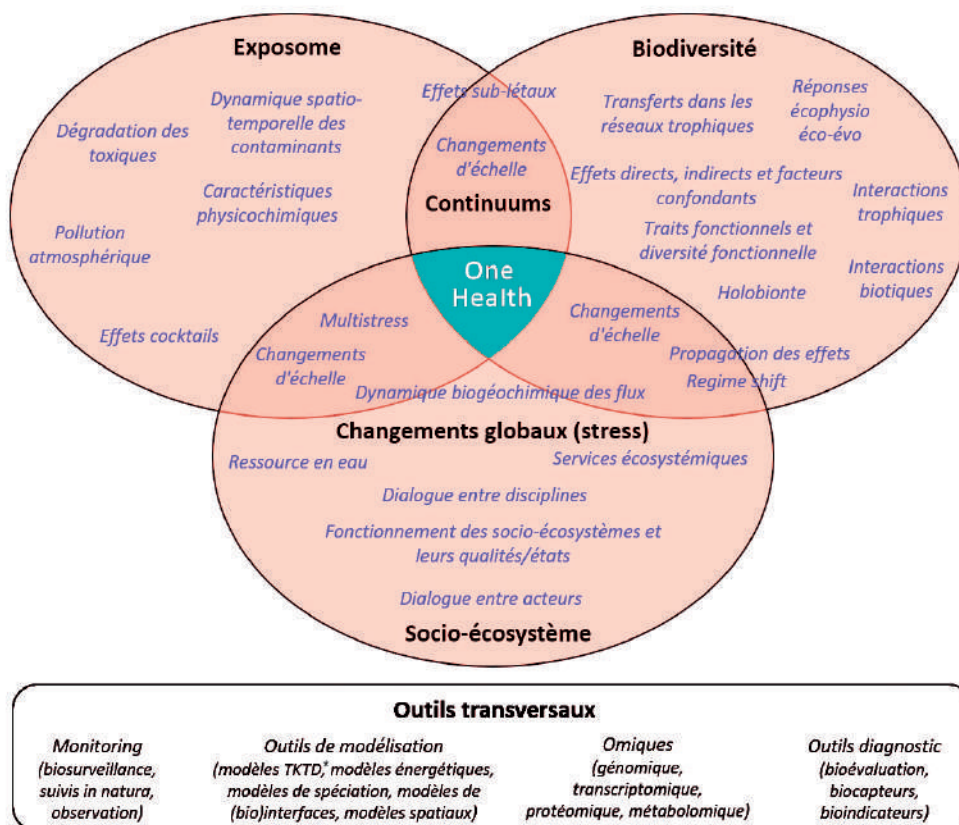


Figure 2. Thématiques abordées dans les contributions (en bleu) et groupement en thèmes fédérateurs et outils transversaux (en noir, entourés par groupe).

Trois thèmes majeurs ont été identifiés pour animer les échanges au sein de l'atelier :

- ▶ Exposome
- ▶ Effets directs et indirects des contaminants sur la biodiversité et rétroactions
- ▶ Géo-anthro-écosystèmes : continuums

Avec 124 inscrits, l'atelier a bénéficié d'une forte participation qui a permis de réunir une large communauté : 44 établissements et 70 unités de recherche. Cette participation illustre la mobilisation de la communauté de CNRS Écologie & Environnement et plus largement des communautés de recherche en sciences de l'environnement et sur la biodiversité autour de la problématique « pollutions et écosystèmes », au-delà du seul champ de l'écotoxicologie.

## Questions de recherches futures, freins et verrous

### Une multitude de contaminants chimiques

#### Comment appréhender l'exposition, les co-expositions et l'éco-exposome ?

Concernant le stress chimique, la caractérisation de l'exposition « sur le temps long » et celle de l'éco-exposome sont des enjeux majeurs. Il est nécessaire de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle, la périodicité et l'amplitude de

la pression chimique à laquelle les organismes sont exposés. La question de la nature même de cette exposition (profils de contamination) est centrale et requiert le développement d'outils analytiques et d'approches métrologiques innovantes, y compris au niveau ultra-traces (Escher *et al.*, 2020). Nos efforts doivent se poursuivre pour estimer la fraction

biodisponible des contaminants et la mesure des concentrations intracellulaires. Il est également indispensable de prendre en compte la transformation éventuelle des polluants au cours de l'exposition (métabolisation), et d'étudier tant les composés parents que d'éventuels produits de transformation biotique et abiotique.

L'approche intégrative de la caractérisation de l'éco-exposome et des effets associés à l'exposition aux polluants se heurte à différents verrous. L'homogénéisation des approches et la définition des échelles de temps pertinentes est nécessaire, mais complexe, car dépendante du milieu, des polluants, des organismes, de leur stade de vie... Des approches ciblées sur des stades critiques (ex. embryonnaire ou maturation sexuelle) apparaissent essentielles. L'acquisition de données à l'échelle du cycle de vie (ex. approches longitudinales ou transversales) est pertinente pour identifier les causes d'effets à l'échelle individuelle, voire trans-générationnelle. L'amélioration du réalisme écologique des approches expérimentales mises en œuvre dans le cadre d'un changement d'échelle (ex. de l'individu à la communauté) permet de renforcer nos conclusions sur l'évolution de la biodiversité et la résilience des communautés. La question des plans expérimentaux retenus pour y parvenir est centrale (conditions, effectifs, doses...).

#### **Comment prédire les « effets cocktails » ?**

La confrontation des résultats issus de la caractérisation de l'exposition et de celle des effets sur les biocénoses peut conduire à la mise en évidence d'associations intéressantes pour des approches de type « poids de l'évidence ».

### **Multi-stress et changements globaux**

#### **Comment développer la prédiction dans un contexte de changements globaux ou multistress ?**

Il est nécessaire de développer une vision intégrée de l'ensemble des facteurs de stress auxquels peut être soumis un organisme dans le contexte des changements globaux et du multistress : pression chimique (éléments traces, polluants organiques, plastiques...), stress abio-

Néanmoins, cette démarche permet rarement de mettre en évidence des liens de causalité (Tian *et al.*, 2021) ; ceux-ci sont pourtant indispensables à la compréhension des relations exposition-effet. De plus, les relations dose-réponse peuvent être non linéaires : des outils permettant d'en faciliter l'interprétation et la prédiction sont nécessaires. Les situations de mono-exposition, qui peuvent permettre d'associer un polluant à un mécanisme d'action, ne reflètent cependant pas la complexité des expositions *in situ*. Ainsi, la compréhension et la prédiction des « effets cocktails » représentent un frein scientifique soulevé depuis des années mais demeure une question centrale. Outre les approches statistiques, il faut développer des approches plus mécanistes pour identifier les contributions relatives des différentes composantes de l'éco-exposome et déterminer les principaux facteurs de risque dans les mélanges complexes.

Les verrous identifiés sont relatifs à la multitude de mélanges possibles. Le manque de connaissances descriptives de l'exposition réelle limite les possibilités d'identification de mélanges à étudier en priorité : composés les plus fréquents, les plus largement répartis ou les plus dangereux. *In situ*, les freins sont souvent logistiques et le nombre d'échantillons analysables est souvent bien inférieur au nombre nécessaire à une interprétation robuste. En conditions contrôlées, il paraît démesuré voire impossible, en respectant le cadre des 3Rs\* pour l'expérimentation animale, de mesurer les réponses du vivant aux milliers de combinaisons possibles, surtout si ces tests ont pour objectif de reproduire des phénomènes réalistes tels que des pics de concentration ou des répétitions d'exposition à des doses variées (Escher *et al.*, 2020).

tiques (hypoxie, variations de température ou de salinité, pollution lumineuse ou sonore...), stress biotiques (modification des relations proies-prédateurs, pathogènes, parasites...), altérations du milieu : pertes d'habitat, ou modifications du régime hydrologique. Les priorités de recherche consistent à prendre en compte les interactions entre les effets des polluants et ceux des autres facteurs de stress et leurs conséquences sur le biote pour mettre en lumière les effets en chaîne.

En outre, les mécanismes d'adaptation des milieux et des organismes peuvent conduire à une augmentation ou une réduction de la résistance

ou tolérance de l'écosystème et de ses organismes à d'autres stressseurs anthropiques qu'il est essentiel d'évaluer (ex. *stress shield concept*).

## Réseaux d'interactions écologiques

### Quelles sont les conséquences sur les interactions biotiques ?

L'estimation des conséquences directes et indirectes des pollutions doit s'appuyer sur une connaissance approfondie des relations biotiques pour mieux comprendre la propagation des effets et des contaminants dans les réseaux trophiques. Il faut prendre en compte les interactions trophiques mais aussi non trophiques : facilitation, compétition, syntrophie, mutualisme, symbiose... Ces dernières sont trop souvent ignorées alors qu'elles peuvent avoir des conséquences écosystémiques. Les réseaux d'interactions permettent de modéliser les liens de causalité et potentiellement de prédire des effets imbriqués autrement difficiles à établir. Certaines de ces interactions commencent à être étudiées à l'échelle de l'holobionte, mais cette vision plus holistique des organismes n'est pas encore généralisée. Alors que l'on connaît désormais l'interdépendance entre hôte et microbiote, le rôle de ce dernier sur la réponse

de l'hôte reste une question d'actualité, en particulier dans un contexte écotoxicologique.

### Quels taxons considérer ?

Pour prendre en compte ces réseaux d'interactions, les expérimentations doivent considérer des réseaux de plus en plus complexes pour évaluer les liens de causalité, étudier des processus ciblés, analyser les flux d'énergie et visualiser les conséquences sur la structure et le fonctionnement du réseau. Les études sur les espèces modèles ont leurs limites, ce qui appelle à renouveler les approches en travaillant à l'échelle des communautés en considérant les différents domaines du vivant. Or, certains taxons sont aujourd'hui sous-étudiés et certains maillons trophiques manquent dans de nombreux travaux (ex. microfaune). De même, les espèces rares sont souvent négligées alors qu'il peut s'agir d'espèces clé de voûte, possédant une fonction primordiale, ou capable d'émerger en situation de stress.

## Impacts des contaminants sur les écosystèmes

### Comment prendre en compte les conséquences fonctionnelles dans l'évaluation des impacts ?

Les liens entre stress abiotique et changement comportemental ou conséquences fonctionnelles ne sont pas établis. Il faut aller vers une évaluation plus fine de l'impact sur les fonctions, voire à terme, sur les services écosystémiques. Plus que les listes taxonomiques, la diversité fonctionnelle doit être au cœur de nos travaux. Il faut déployer des approches basées sur les traits fonctionnels, des approches d'inférence fonctionnelle ou des approches (méta)omiques. Il est urgent de comprendre quels sont les traits génétiques, adaptatifs et physiologiques qui gouvernent la sensibilité ou la tolérance (avantages écologiques) des organismes en condition de stress anthropique. Les variations inter-individuelles sont souvent ignorées alors que mesurer spécifiquement la

réponse individuelle au sein d'une même population est susceptible de nous renseigner sur la résistance et la capacité de résilience de la communauté. Plusieurs verrous ont été identifiés concernant ces approches fonctionnelles, au niveau du changement d'échelle, de la prise en compte de la variété des groupes fonctionnels (constitués de différents organismes), de la difficulté de mesurer certaines fonctions *in situ* et du choix des traits les plus pertinents.

### Comment prédire les cascades d'événements et les points de bascule ?

Les cascades d'évènements (effets indirects négatifs, positifs, neutres et facteurs confondants) prenant place à l'échelle infra-individuelle (régulations moléculaires), à plus grande échelle (entre organismes de l'écosystème), ou de manière

temporelle (effet intergénérationnel) doivent être examinées. Elles peuvent induire un *regime shift*, i.e. un changement de régime écologique important et soudain qui entraîne des modifications de la dynamique interne d'un écosystème sur de longues périodes, conduisant à un nouvel état permanent. Le défi est de prédire l'occurrence des mécanismes de tolérance, résistance et résilience pour modéliser les conséquences démographiques sur le long terme. Les verrous sont le choix des échelles spatiale et temporelle, la définition de l'état initial et la détermination de l'état final. Le rôle de la communication chimique entre organismes est une question à laquelle il faut particulièrement s'intéresser. La méconnaissance des systèmes de communication intra- et inter-espèces est limitante ; les analyses des métabolomes et volatomes sont encore rares et souffrent d'un manque de bases de données correctement renseignées. L'acclimatation des communautés suite à une contamination ne doit pas être négligée, car elle peut, par exemple, conduire à la sélection de micro-organismes capables de dégrader les toxiques et ainsi contribuer, par exemple, à une bioremédiation naturelle. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettrait de promouvoir leur utilisation par les acteurs de la société civile.

#### **Comment améliorer nos connaissances sur l'impact des pollutions sur la biodiversité ?**

Évaluer l'impact des pollutions sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes nécessite de pouvoir mettre en relation les contaminations des différents compartiments avec les réponses écophysiologicals des organismes qui y vivent et la dynamique des populations et communautés. Des structures d'observation existent pour la mesure de paramètres physico-chimiques et pour le suivi des contaminations. Cependant, elles intègrent insuffisamment les mesures de composantes biologiques et écologiques, ce qui limite l'exploitation des données dans une perspective d'estimation des impacts écotoxicologiques.

De nouvelles questions de recherches sont soulevées pour des écosystèmes sous-étudiés : écosystèmes urbains, technosols, milieux souterrains et profonds (marins, gisements, mines, aquifères...) pour lesquels l'impact anthropique est moins voire pas exploré. Les études doivent nécessairement être menées en amont des

modifications engendrées par les interventions humaines et industrielles sur ces milieux.

Les approches doivent évoluer vers l'intégration des transferts trans-compartiments et trans-écosystèmes (entre écosystèmes aquatiques et terrestres et aux interfaces avec l'atmosphère) au sein de continuums et au niveau des zones de transition : transferts de contaminants, micro-organismes ou gènes, propagation des impacts.

Les verrous pour le développement de banques d'échantillons sont liés à des enjeux scientifiques, tels que le choix des matrices et les stratégies de conservation à privilégier, et à des freins structurels et pratiques : coûts financiers, besoins humains, locaux et équipements, empreinte carbone... Concernant les suivis *in natura*, le format des appels à projets de recherche (APR) correspond à des financements sur le court terme, entraînant une déconnexion entre la durée des budgets et les durées d'observation pertinentes et une difficulté pour opérer des suivis pérennes. Ce système engendre un manque de réactivité face aux crises environnementales et limite la possibilité d'acquisition de données empiriques (ex. redémarrage perpétuel de nouveaux projets, dispersion des moyens). D'autres freins sont liés à la multiplicité des réglementations, des écosystèmes concernés et des polluants qui impliquent une multiplicité d'acteurs dans la recherche, la société civile et les politiques publiques. La problématique réunit de nombreux organismes et agences : universités, CNRS (CNRS Écologie & Environnement, CNRS Terre & Univers, CNRS Chimie, CNRS Biologie), ADEME, Agences de l'eau, ANSES, INRAE, IFREMER, FRB, OFB, MNHN, INSERM, INERIS, IRSN... Il en résulte une communauté éclatée et des données dispersées, ce qui nuit au développement de stratégies interdisciplinaires, holistiques et concertées.

## Évaluation du risque environnemental (ERE)

### Quels sont les écueils des procédures actuelles d'ERE pour atteindre les objectifs de protection des écosystèmes ?

La nécessité d'une ERE impliquant chronicité de l'exposition, évaluation sur le long terme et exposition à des faibles doses est mise en avant. L'ERE est aussi questionnée sur la pertinence des modèles biologiques en termes de représentativité pour les écosystèmes contaminés et la pertinence des scénarios d'exposition basés sur des tests mono-substances ne considérant pas les aspects multi-stresseurs. Le besoin de normalisation de nouveaux tests est soulevé. Des questionnements émergent sur l'impossibilité d'établir des « seuils » (ex. normes de qualité environnementale) pour certaines substances, la prise en compte de la variabilité et de l'incertitude dans les démarches, la définition des objectifs de protection, la considération de stressseurs multiples, dont l'évolution du climat, la prise en compte des co-expositions, y compris à travers des approches par famille (*group testing*) (ECHA, 2021). La temporalité des démarches est aussi questionnée par rapport au « vieillissement » des contaminations, qui peut impliquer une diminu-

tion de la biodisponibilité dans certains cas (résidus liés) mais une re-mobilisation dans d'autres, et par rapport au manque d'exploitation des travaux de recherche antérieurs.

### Dans quelle direction faire évoluer l'ERE ?

La définition de la « pollution », du caractère « émergent » des contaminants ou de « l'acceptabilité » du risque n'est pas stable dans le temps et fait l'objet de décalages de vision entre les différentes communautés scientifiques : chimistes, toxicologues, écologues, juristes, sociologues, anthropologues... soulignant le besoin d'une science de l'ERE plus intégrative. De nouveaux critères de catégorisation des contaminants seraient pertinents, ils sont aujourd'hui trop dépendants de la réglementation (classement selon leurs familles chimiques et leur usage). En conséquence, les contextes d'étude (ex. interlocuteurs, écosystèmes, modèles, financements) et les procédures d'ERE dépendent plus des aspects juridiques que des aspects scientifiques. Enfin, l'ERE actuelle n'intègre pas ou peu les fonctions écologiques et les services écosystémiques associés.

## Moyens, outils et leviers

### Mieux exploiter les outils existants et les approches récentes

La complexité de l'exposition et de sa dynamique requiert l'utilisation d'outils analytiques innovants. Il est essentiel de combiner des approches d'analyse chimique complémentaires pour appréhender l'endo-métabolome/volatolome et le xéno-métabolome (xénobiotiques parents et produits de transformation associés) : méthodes ciblées quantitatives et méthodes non ciblées (criblage) basées sur la spectrométrie de masse haute résolution permettant la recherche de composés pré-identifiés « suspects » voire l'identification de composés « inconnus ». Cette approche doit nécessairement reposer sur l'utilisation de bases de données développées par et pour nos communautés. L'appréhension des variations temporelles et spatiales de l'exposition pourra s'appuyer sur des mesures haute

fréquence à des périodes clé (utilisation de laboratoires mobiles), l'utilisation d'échantillonneurs permettant une intégration temporelle, le développement instrumental de biocapteurs et de capteurs embarqués sur la faune, le traçage isotopique : isotopes stables et radioisotopes. Les approches bioanalytiques apporteront des informations supplémentaires, pour mesurer l'activité d'extraits en complément des analyses chimiques (tests *in vitro*) ou en mesurant directement les conséquences de l'exposition chez l'espèce concernée (expression de gènes ou de protéines, activités enzymatiques, abondance de métabolites endogènes...).

Il faut poursuivre notre étude des mécanismes cellulaires en favorisant des mesures sur cellules individuelles grâce aux outils omiques et

d'ingénierie écologique. L'état de santé des milieux doit être évalué par des mesures directes de la réponse métabolique, écophysiological, épigénétique, génomique, comportementale et la plasticité phénotypique des individus et populations. La variabilité inter- et intra-populationnelle doit être regardée attentivement. L'utilisation plus systématique de certains *proxys* d'impact (détection de multi-résistance, organismes bioindicateurs ou sentinelles) ou de nouveaux indicateurs (combinaison de traits, réseaux d'interactions biologiques..., Bruder *et al.* 2019) conduira à estimer plus finement l'impact des stressors et la propagation des effets. Le déploiement à plus large échelle spatiale et temporelle de l'approche PICT (*pollution induced community tolerance*, Tlili *et al.*, 2016) appliquée aux communautés microbiennes naturelles pourrait permettre de mieux appréhender les effets sélectifs spécifiques de différents polluants et de développer un nouvel outil de diagnostic de la pression chimique. L'analyse de l'ADN environnemental doit se généraliser pour étudier de manière plus exhaustive la biodiversité. Cela nécessite néanmoins que les bases de données

génomiques d'un grand nombre de taxons soient alimentées voire créées. Les approches basées sur l'utilisation des isotopes stables peuvent permettre d'identifier des liens trophiques ou des métabolismes d'intérêt.

Il faut améliorer notre vision de la biodiversité en étudiant les impacts sur les fonctions et services écosystémiques. Les aspects fonctionnels doivent bénéficier des outils de séquençage haut débit (métagénomique, métatranscriptomique) et du développement de la métaprotéomique. Par ailleurs, les approches basées sur les traits fonctionnels doivent se généraliser à un plus grand nombre d'organismes ; il faut ainsi créer et alimenter des bases de données de traits fonctionnels et assurer leur interopérabilité avec l'aide de l'Intelligence Artificielle. La télédétection, l'emploi des drones et les outils numériques permettent l'acquisition d'information à l'échelle des paysages et des écosystèmes à mieux exploiter. Enfin, la communauté des écotoxicologues doit s'emparer des proxys développés dans d'autres champs disciplinaires et intégrer les aspects socio-économiques pour mesurer les fonctions et services écosystémiques à large échelle.

### Améliorer les approches expérimentales

Pour améliorer les plans expérimentaux, des dispositifs complémentaires sont évoqués : du microcosme (permettant des approches mécanistes) aux mésocosmes en conditions contrôlées ou semi-contrôlées (écotron) jusqu'aux observations de terrain. Des réflexions sur des plans expérimentaux incluant des covariations de facteurs de stress ou des variables stables vs fluctuantes en tenant compte des enjeux de modélisation seraient bénéfiques au développement de scénarios prospectifs.

Les approches *in situ* permettent de tester des situations réelles, plus complexes, pour tenter de hiérarchiser les facteurs de contrôle et explorer la généralité des résultats obtenus (sous réserve de répliquer les études dans différents types d'écosystèmes). Ces travaux *in situ* devraient s'appuyer sur des réseaux d'expérimentation existants : AnaEE-France, Zones Ateliers (ZA) et Observatoires Hommes-Milieu (OHM), dispositif DEPHY\* et réseau JEVl\*...

### Développer les observations, régulières et sur de longues périodes, en écotoxicologie

Un point crucial identifié est de passer de l'acquisition ponctuelle (dans l'espace ou le temps) fractionnée, à l'acquisition pérenne et structurée dans l'espace, de données ouvertes. Le développement de l'observation dans un cadre de type LTSER\* ou programme AMAP\* semble une évolution nécessaire. Le besoin d'une visibilité des actions et des systèmes d'observation spatialisée est soulevé, et l'ouverture à des réseaux

tels que SIST\* serait une plus-value. Les réseaux comme RECOTOX devraient être regroupés, développés, renforcés et étendus, les suivis restants émergents, morcelés et manquant cruellement de soutiens humains et financiers. Les efforts pourraient être concentrés dans un premier temps sur des réseaux de sites déjà équipés/suivis afin également de mieux organiser et rationaliser la bancarisation d'échantillons



## Faire appel à la modélisation

La modélisation (approches statistiques, modèles empiriques SEM *structural equation models* ou modèles mécanistiques) est évoquée comme l'une des solutions incontournables (Figure 2) pour comprendre les mécanismes à l'échelle cellulaire, aborder les « effets cocktails », la prédiction des réponses en contexte multi-stress, représenter les réseaux d'interactions écologiques, effectuer des transferts d'échelle, prédire l'exposition spatiale et temporelle, et développer des outils d'appui à l'ERE et d'aide à la décision (scénarios réalistes et testables). Les approches d'intelligence artificielle ont été évoquées pour mieux appréhender la complexité à l'échelle écosystémique. La nécessité de renforcer le dialogue entre expérimentateurs et modélisateurs (physico-chimistes, physiciens, mathématiciens...), qui doit être encouragé à toutes les étapes du processus de recherche de la co-construction de questionnements en amont à la conception des plans expérimentaux, est soulignée. Cette démarche doit aussi pallier le manque de données en entrée et

sortie des modèles, essentielles pour leur calibration et leur validation.

Il est proposé de compléter la recherche sur l'exposome par le concept d'*Adverse Outcome Pathway* (AOP, quantitative AOP, réseau d'AOP pour représenter les effets cascades) pour faciliter la compréhension des effets des divers facteurs de stress. Ces approches doivent à l'avenir s'adapter pour s'appliquer :

- à des communautés complexes ;
- à des cascades d'évènements qui ne sont pas forcément négatives ;
- à des variations temporelles dans un système dynamique.

Pour cela, les écologues/écotoxicologues doivent s'approprier ce concept d'AOP, notamment dans les disciplines où il est peu développé (microbiologie). Le couplage d'approches de modélisation sur la toxicocinétique/toxicodynamique et de modélisation dynamique et spatialement explicite semble une évolution prometteuse et nécessaire qui devra encore s'élargir en y incluant des facteurs de stress supplémentaires.

## Renforcer les interactions entre structures existantes et développer la transdisciplinarité

La problématique « Pollutions et écosystèmes » est résolument interdisciplinaire, elle dépasse le seul cadre de CNRS Écologie & Environnement et doit associer d'autres acteurs (cf. impact des contaminants sur les écosystèmes). Il est important de décloisonner les études disciplinaires, par exemple via des projets collaboratifs *bottom-up*. La structuration de la communauté à plus large échelle doit être poursuivie, via des réseaux existants (GDR Polymères et Océans, GDR Ecotoxicologie Aquatique, réseau EcotoxicoMic...) et via la création de nouveaux réseaux pour développer des approches transdisciplinaires. Des passerelles entre écotoxicologie, écologie fonctionnelle, biologie de la conservation, chimie, sciences pour

l'ingénieur, physique des milieux poreux, géographie, histoire et sciences humaines et sociales sont à mettre en œuvre ; se rapprocher des structures travaillant déjà dans ces domaines est un levier potentiel.

Il est essentiel de favoriser les apports mutuels entre structures (instituts de recherche, agences et offices nationaux...) pour avoir une meilleure visibilité des mesures et des données acquises et les mettre à disposition. Les initiatives telles que *data.gouv* sont intéressantes mais une « cartographie » des données écotoxicologiques existantes avec l'implémentation d'un thésaurus commun intégré dans les métadonnées est nécessaire pour en renforcer l'exploitabilité.

## Fédérer les sciences et les acteurs pour une meilleure ERE

Les procédures d'ERE pourraient être améliorées grâce à l'application de nouveaux outils diagnostiques et tests écotoxicologiques permettant, par exemple, la prise en compte de nouveaux

traits comportementaux ou fonctionnels et des réponses à l'échelle des communautés. Des évolutions réglementaires vers le suivi des contaminations dans les différents compartiments, mais

aussi des éléments impactés par les polluants, sont requises, en incluant des mesures d'imprégnation mais aussi d'autres marqueurs (ex. gènes de résistance). L'application d'approches probabilistes, bayésiennes notamment, pour caractériser l'incertitude et fournir des gammes de variations permet de s'affranchir des problèmes inhérents aux facteurs de sécurité et aux seuils des approches actuelles, et de mieux communiquer l'interprétation des résultats aux gestionnaires et décideurs.

Les aspects de standardisation des protocoles et outils développés dans les laboratoires de recherche conduisent à de nouveaux besoins et de nouveaux métiers dédiés pour les transferts « technologiques » et les démarches de normalisation/dépôts de brevets.

Une vision plus intégrative de l'ERE doit être dé-

veloppée pour faire le lien entre aménagement du territoire, changements sociétaux et vulnérabilité des socio-écosystèmes pour contextualiser le risque grâce à un panel plus large d'indicateurs (environnementaux, sociaux et économiques, à différentes échelles spatiales). Une meilleure collaboration avec les acteurs économiques et industriels (ex. développement de nouvelles molécules et procédés verts) permettrait d'intégrer le risque très en amont en suivant des principes d'éco-conception et de solutions basées sur la nature. L'implémentation en routine de nouvelles approches issues de la recherche implique d'autres enjeux : appropriation par les régulateurs et utilisateurs, évolution plus rapide de la législation et application de la justice environnementale par exemple, qui relèvent de champs thématiques des sciences humaines et sociales.

## RÉFÉRENCES

- Ankley, G.T., Cureton, P., Hoke, R.A., Houde, M., Kumar, A., Kuriyas, J., et al. (2021). Assessing the Ecological Risks of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Current State-of-the Science and a Proposed Path Forward. *Environ. Toxicol. Chem.*, 40, 564–605.
- Banerjee, S. & van der Heijden, M.G.A. (2023). Soil microbiomes and one health. *Nat. Rev. Microbiol.*, 21, 6–20.
- Barouki, R. (2020). L'exposome, un concept holistique et utile. *Bul. Acad. Nat. Méd.*, 204, 299–305.
- Beketov, M.A. & Liess, M. (2012). Ecotoxicology and macroecology – Time for integration. *Environ. Pollut.*, 162, 247–254.
- Bernhardt, E.S., Rosi, E.J. & Gessner, M.O. (2017). Synthetic chemicals as agents of global change. *Front. Ecol. Environ.*, 15, 84–90.
- Bonebrake, T.C., Guo, F., Dingle, C., Baker, D.M., Kitching, R.L. & Ashton, L.A. (2019). Integrating Proximal and Horizon Threats to Biodiversity for Conservation. *Trends Ecol. Evol.*, 34, 781–788.
- Bruder, A., Frainer, A., Rota, T. & Primicerio, R. (2019). The Importance of Ecological Networks in Multiple-Stressor Research and Management. *Front. Environ. Sci.*, 7.
- Brühl, C.A. & Zaller, J.G. (2019). Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides. *Front. Environ. Sci.*, 7.
- Destoumieux-Garzón, D., Mavingui, P., Boetsch, G., Boissier, J., Darriet, F., Duboz, P. et al. (2018). The One Health Concept: 10 Years Old and a Long Road Ahead. *Front. Vet. Sci.*, 5.
- Duperron, S., Halary, S., Gallet, A. & Marie, B. (2020). Microbiome-Aware Ecotoxicology of Organisms: Relevance, Pitfalls, and Challenges. *Front. Public Health*, 8.
- Escher, B.I., Hackermüller, J., Polte, T., Scholz, S., Aigner, A., Altenburger, R., et al. (2017). From the exposome to mechanistic understanding of chemical-induced adverse effects. *Environ. Int.*, 99, 97–106.
- ECHA, 2021. Transparent progress in addressing substances of concern - Integrated Regulatory Strategy Annual Report 2021. Gilbert, N. (2011). Data gaps threaten chemical safety law. *Nature*, 475, 150–151.
- Groh, K., vom Berg, C., Schirmer, K. & Tilili, A. (2022). Anthropogenic Chemicals As Underestimated Drivers of Biodiversity Loss: Scientific and Societal Implications. *Environ. Sci. Technol.*, 56, 707–710.
- Hartung, T. & Rovida, C. (2009). Chemical regulators have overreached. *Nature*, 460, 1080–1081.
- 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.
- Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Singh, M., Joshi, D., et al. (2021). Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 24917–24939.
- Kraus, J.M., Wesner, J.S. & Walters, D.M. (2021). Insect-Mediated Contaminant Flux at the Land–Water Interface: Are Ecological Subsidies Driving Exposure or Is Exposure Driving Subsidies? *Environ. Toxicol. Chem.*, 40, 2953–2958.
- Medina, M.H., Correa, J.A. & Barata, C. (2007). Micro-evolution due to pollution: Possible consequences for ecosystem responses to toxic stress. *Chemosphere*, 67, 2105–2114.
- Naidu, R., Biswas, B., Willett, I.R., Cribb, J., Kumar Singh, B., Paul Nathanael, C., et al. (2021). Chemical pollution: A growing peril and potential catastrophic risk to humanity. *Environ. Int.*, 156, 106616.
- Orr, J.A., Vinebrooke, R.D., Jackson, M.C., Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Mantyka-Pringle, C., et al. (2020). Towards a unified study of multiple stressors: divisions and common goals across research disciplines. *Proc. Royal Soc. B*, 287, 20200421.
- Persson, L., Carney Almroth, B.M., Collins, C.D., Cornell, S., de Wit, C.A., Diamond, M.L., et al. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ. Sci. Technol.*, 56, 1510–1521.
- Rosenfeld, C.S. (2017). Gut Dysbiosis in Animals Due to Environmental Chemical Exposures. *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, 7.
- Saaristo, M., Brodin, T., Balshine, S., Bertram, M.G., Brooks, B.W., Ehlman, S.M., et al. (2018). Direct and indirect effects of chemical contaminants on the behaviour, ecology and evolution of wildlife. *Proc. Royal Soc. B*, 285, 20181297.
- Scholz, S., Nichols, J.W., Escher, B.I., Ankley, G.T., Altenburger, R., Blackwell, B., et al. (2022). The Eco-Exposome Concept: Supporting an Integrated Assessment of Mixtures of Environmental Chemicals. *Environ. Toxicol. Chem.*, 41, 30–45.
- Seibold, S., Cadotte, M.W., MacIvor, J.S., Thorn, S. & Müller, J. (2018). The Necessity of Multitrophic Approaches in Community Ecology. *Trends Ecol. Evol.*, 33, 754–764.
- Tian, Z., Zhao, H., Peter, K.T., Gonzalez, M., Wetzell, J., Wu, C., et al. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371, 185–189.
- Tilili, A., Berard, A., Blanck, H., Bouchez, A., Cássio, F., Eriksson, K.M., et al. (2016). Pollution-induced community tolerance (PICT): towards an ecologically relevant risk assessment of chemicals in aquatic systems. *Freshwater Biol.*, 61, 2141–2151.
- Topping, C.J., Aldrich, A. & Bery, P. (2020). Overhaul environmental risk assessment for pesticides. *Science*, 367, 360–363.
- Vijver, M.G., Hunting, E.R., Nederstigt, I.A.P., Tamis, W.L.M., van den Brink, P.J. & van Bodegom, P.M. (2017). Postregistration monitoring of pesticides is urgently required to protect ecosystems. *Environ. Toxicol. Chem.*, 36, 860–865.
- Vinebrooke, D., R., L. Cottingham, K., Norberg, M.S., Jon, I. Dodson, S., C. Maberly, S. & Sommer, U. (2004). Impacts of multiple stressors on biodiversity and ecosystem functioning: the role of species co-tolerance. *Oikos*, 104, 451–457.
- Wild, C.P. (2005). Complementing the Genome with an “Exposome”: The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.*, 14, 1847–1850.



# Migrations humaines & impacts sur l'environnement non-humain

Auteurs : Paul Verdu (EAE), Marjan Mashkour (AASPE), Myriam Valero (EBEA)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Construire de nouvelles méthodes interdisciplinaires pour déterminer les causes des migrations humaines et non-humaines passées : quelles espèces/populations/organismes sont concernés par les migrations et pourquoi ?
- ▶ Etudier les co-migrations dans des projets pensés pour des approches conjointes plutôt que juxtaposées
- ▶ Prédire l'évolution biologique et/ou culturelle des espèces et des écosystèmes sous l'effet des migrations

## État des lieux

Les migrations sont des mécanismes fondamentaux de l'évolution biologique, génétique et écologique, qui concernent potentiellement toutes les espèces vivantes, y compris celle d'*Homo sapiens*. En effet, migrations et métissages (entre populations d'une même espèce) ou hybridations (entre espèces différentes) accroissent mécaniquement la diversité génétique de ces populations en faisant apparaître de nouvelles combinaisons génétiques, elles-mêmes objet de l'évolution et des processus de sélection. Pour toutes les espèces pratiquant une forme ou une autre de culture (c'est-à-dire l'ensemble des comportements transmis d'une génération à la

suivante par des voies non génétiques), les migrations représentent également des processus essentiels de changements, de diversification et de diffusions de leurs pratiques culturelles. Ainsi, les migrations humaines ont joué un rôle prépondérant tout au long de notre histoire évolutive et culturelle. Aussi, les humains ne migrent pas seuls. De nombreux organismes vivants ont accompagné, de manière induite, forcée ou fortuite, les déplacements humains à travers le monde, participant ainsi à modifier profondément les paysages et à bouleverser, parfois de façon dramatique et irréversible, les écosystèmes et la biodiversité aquatique et terrestre préexistante.

### Diversité de disciplines et d'échelles spatio-temporelles

De très nombreuses disciplines scientifiques pratiquées au sein de CNRS Écologie & Environnement (paléontologie et paléo-anthropologie, histoire, archéologie et bio-archéologie, écologie et ethno-écologie, botanique et ethno-botanique, zoologie et ethno-zoologie, dynamique des populations et bio-démographie, génétique des populations, anthropologie culturelle, linguistique...) mobilisent leurs méthodes et outils pour étudier les migrations, souvent de manière interdisciplinaire, toujours de manière pluridisciplinaire : il est en effet nécessaire de les mobiliser conjointement pour étudier les migrations dans leurs différentes dimensions spatiales, temporelles, écologiques, et culturelles, afin de mieux comprendre et prédire leur influence sur l'évolution passée et future des populations, des sociétés et des écosystèmes. C'est cette diversité d'approches scientifiques et de connaissances produites, qui a été révélée par les contributions orales et écrites par de nombreux groupes de recherche durant notre atelier.

En pratique, l'étude des migrations prend des formes variées selon les objets et espèces étudiés et selon les définitions disciplinaires des migrations et de leurs processus. Cette diversité implique un travail essentiel de dialogue pluri ou interdisciplinaire pour l'étude de ces phénomènes sous plusieurs facettes, très souvent nécessaires à leur compréhension globale. Par exemple, l'étude des migrations en paléonto-

logie, en paléo-anthropologie ou en bio-archéologie s'intéresse aux relations et filiations taxonomiques et phylogénétiques de spécimens sur le temps long et dans des espaces géographiques souvent vastes (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022 ; Prat, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). Ceci est le cas des diffusions des espèces domestiques et/ou sauvages associées à celles d'*Homo sapiens*, et les bouleversements écologiques induits. Par contraste, l'étude des migrations en démographie ou en épidémiologie s'intéresse souvent aux mouvements des individus à un moment ou une génération donnée et sur des échelles géographiques allant du très local au global/mondial (Manni, 2022 ; Rougeron *et al.*, 2022). Par contraste, l'étude des migrations en génétique des populations ou de l'évolution s'intéresse aux flux de gènes à l'intérieur et entre espèces (végétales, animales, algues, fongiques, microbiennes...), entre populations reproductivement isolées aussi bien pour cause d'éloignement géographique que, dans un même espace local, pour des causes culturelles (discriminations, interdits de mariages...) ou phénétiques (liées à des reproductions décalées entre sous-groupes ou communautés), et ce, sur des échelles temporelles très variables, allant des quelques dernières générations au temps très long de l'évolution génétique (Rougeron *et al.*, 2022 ; Valero *et al.*, 2022 ; Verdu, 2022). Enfin, et par contraste là encore, l'étude des migrations culturelles par la linguistique, l'ethnologie ou



l'archéologie s'intéresse aux phénomènes d'emprunts ou de diffusions d'objets, de pratiques, d'idées, ou de langues, avec ou sans migrations

physiques pérennes d'individus (Allassonnière-Tang *et al.*, 2022 ; Manni, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022).

### **S'intéresser aux mécanismes pour construire de nouveaux paradigmes**

Un enjeu important pour ces disciplines mobilisées dans l'étude des migrations est donc de bien distinguer les phénomènes migratoires de leurs mécanismes sous-jacents : expansions, invasions, colonisations, remplacements, dispersions, diffusions, hybridations, métissages, acclimatations, emprunts ou refus d'emprunts... Sous le couvert d'un lexique d'apparence peu spécialisé et utilisé communément par les scientifiques, comme par le grand public, ces mots se réfèrent en fait à des modalités de migrations souvent différentes au sein et entre disciplines. Par exemple, là où « colonisation » et « invasion » se réfèrent, en génétique des populations, en écologie ou en bio-démographie, à des modalités de dispersion spatiales accompagnées de processus démographiques bien particuliers concernant des groupes d'individus, humains ou non-humains, ces termes, en histoire, en archéologie ou en linguistique se réfèrent à des contextes historiques et des modalités socio-politiques (exclusivement humaines). De même, les termes « hybridation » et « métissage » prennent, en pratique, des sens parfois très différents au sein et entre les disciplines de la biologie, de la démographie, de la bio-archéologie, et de la paléontologie (que l'objet d'étude soit humain ou non), et les disciplines de l'anthropologie culturelle, de l'archéologie, de la bio-archéologie et de la linguistique (cf. toutes les contributions).

Ainsi, l'étude nécessairement multi-facettes et multi-échelles des migrations a nécessité, et néces-

site encore aujourd'hui, d'acquérir de nombreux types de données devant être analysées par des méthodes variées, propres aux différentes disciplines impliquées ; et de construire de nouveaux paradigmes, de nouveaux objets d'études et de nouvelles méthodes d'analyses afin de croiser les approches et les résultats dans un cadre interdisciplinaire. Par exemple, la paléontologie et l'archéologie ont intégré les savoirs et savoir-faire historiques de la chimie et de la physique concernant les isotopes et la caractérisation des matériaux afin d'obtenir de nouvelles méthodes de datation et de reconstruction des migrations humaines et non-humaines passées. Aujourd'hui, les avancées de la paléogénomique permettent d'explorer et d'informer de nouvelles questions en paléontologie et en archéologie, concernant l'histoire des migrations humaines et non-humaines, ouvrant ainsi de nouveaux champs interdisciplinaires à ces disciplines (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022 ; Prat, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). Aussi, la linguistique computationnelle s'est développée dans une interdisciplinarité entre linguistique classique et statistiques, et les récents développements mathématiques et informatiques en apprentissage machine ouvrent également de nouveaux champs fertiles de recherche interdisciplinaires sur l'histoire des migrations, diffusions, emprunts et remplacements ayant donné naissance à la diversité culturelle à travers le monde (Allassonnière-Tang *et al.*, 2022).

### **Renforcer la pluri- et l'interdisciplinarité**

Ces travaux pluri- et interdisciplinaires ont permis, et permettent encore, de faire émerger de nombreuses connaissances riches d'enseignements concernant les migrations humaines et non-humaines : potentiellement toutes les espèces vivantes ont migré ou migrent à différentes échelles, aussi bien de temps que d'es-

pace, et elles ne le font souvent pas sans être accompagnées d'autres espèces commensales, parasitaires ou symbiotiques. En effet, de tout temps les migrations d'*Homo sapiens* ont été accompagnées de co-migrations d'autres espèces activement déplacées ; qu'elles aient été vectrices des migrations humaines comme les

animaux de transport ou de trait (Grouard *et al.*, 2022), où qu'elles aient été déplacées activement pour leur intérêt agricole et agronomique, économique, médical, esthétique, symbolique, et/ou rituel (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022 ; Valero *et al.*, 2022 ; Viard *et al.*, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). En outre, les migrations humaines ont été accompagnées de très nombreuses migrations involontaires d'espèces commensales, parasitaires ou pathogènes, voire même de méta-environnements et de microbiomes entiers (Grouard *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022 ; Rougeron *et al.*, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). Enfin, *Homo sapiens* ne migre pas seul ou accompagné d'autres espèces vivantes : ses migrations s'accompagnent aussi de transferts culturels et de référentiels socio-écologiques régissant les rapports Hommes/Nature ayant une profonde influence sur les environnements pré-existants (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022), y compris les environnements pathogéniques pour *Homo sapiens* même (Manni, 2022 ; Rougeron *et al.*, 2022). En conséquence, que les migrations humaines aient été accompagnées de celles d'autres espèces déplacées volontairement ou non, elles ont fréquemment influencé le succès d'installation de ces espèces déplacées

et conditionné l'évolution des écosystèmes et de la biodiversité endémique. En miroir, l'étude d'espèces non-humaines endémiques peut révéler indirectement les routes de migrations humaines passées et les processus démographiques et culturels associés à ces migrations, au travers des bouleversements durables des écosystèmes pré-existants que ces migrations ont entraînés (volontairement ou non) (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Pagnoux *et al.*, 2022 ; Valero *et al.*, 2022 ; Viard *et al.*, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). De même, l'étude des migrations, diffusions, et emprunts culturels humains peut nous renseigner sur les contacts et les processus migratoires démiqes ou purement culturels des populations humaines passées (Allassonnière-Tang *et al.*, 2022).

Ces différents travaux ainsi que de nombreux autres démontrent que comprendre, par des approches interdisciplinaires, les migrations et co-migrations passées, leurs mécanismes et leurs conséquences, permet de prédire et d'anticiper les migrations futures et leurs conséquences évolutives, écologiques, et culturelles et de contribuer significativement à relever les défis écologiques, économiques et énergétiques du monde de demain.

## Questions de recherches futures

Les résultats de ces études pluridisciplinaires interrogent systématiquement les approches et résultats des champs d'étude disciplinaires, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles disciplines se construisant autour de nouveaux objets.

Pour quelques illustrations révélées lors de l'atelier, l'étude des migrations entre linguistique et démographie, dans le contexte de la pandémie de Covid 19, interroge l'épidémiologie et la santé publique (Manni, 2022). En outre, l'étude des migrations entre linguistique et statistiques concernant la distribution de la diversité de certains traits linguistiques de par le monde, interroge l'histoire et l'ethnologie (Allassonnière-Tang *et al.*, 2022). De leur côté, génétique des populations et épidémiologie, dans le contexte des mi-

grations humaines récentes associées à celles du vecteur de la malaria, interrogent l'histoire, l'évolution et l'écologie (Rougeron *et al.*, 2022). L'étude des migrations aux travers de l'histoire et de l'archéo-botanique des herbiers permet d'interroger la systématique et l'agronomie (Pagnoux *et al.*, 2022). Celle conduite par l'archéo-zoologie et l'histoire concernant les routes de la soie et la domestication de l'âne, interroge la génétique de l'évolution et l'écologie (Grouard *et al.*, 2022 ; Mashkour *et al.*, 2022 ; Vila *et al.*, 2022). Ces derniers exemples montrent que les mondes anciens ont permis des mobilités et des migrations à grande échelle, qui sont des outils de globalisation. Ainsi, ils permettent de s'interroger sur leur potentielle contribution aux défis écologiques, économiques et énergé-

tiques du monde de demain. De plus, beaucoup des plantes et d'animaux introduits lors des conquêtes historiques sont devenus invasifs. La gestion des espèces invasives ou envahissantes, considérées aujourd'hui comme un enjeu écologique, économique et sociétal, pourrait aussi être éclairée par la prise en compte du processus de décolonisation dans de nouvelles approches interdisciplinaires (Atlan, 2022).

Enfin, l'étude des migrations par la génétique des populations et la bio-informatique, dans leurs approches théoriques et méthodologiques, interroge l'évolution, l'écologie, l'épidémiologie ou l'agronomie (Verdu, 2022). Par exemple, les processus d'hybridation lors des invasions interrogent sur les méthodes à mettre en place pour les identifier et sur les mécanismes responsables de leur succès (Viard *et al.*, 2022). Dans l'ensemble, répondre à ces questions nécessite la mise en œuvre d'approches interdisciplinaires permettant une caractérisation fine des environnements, des cultures, des phénotypes et des génotypes des lignées, populations ou espèces, mises en contact dans le passé et aujourd'hui.

Dans ce contexte, les travaux de la paléontologie et de la paléo-anthropologie, notamment, posent explicitement les questions des causalités des migrations passées (Prat, 2022) : qui migre et pour quelles raisons ? mettant ainsi en exergue la prochaine frontière en fait commune pour de nombreuses disciplines impliquées dans l'étude des migrations. En effet, les outils déployés entre de nombreuses disciplines permettent de reconstruire les événements de migrations passées et leurs modalités et processus, comme illustré ci-dessus, mais rarement de tester formellement les sources causales possibles. Ces approches et études adressent les « quand et comment » des migrations, mais pas les « pourquoi ». Les causes sous-jacentes à ces processus seraient-elles dues à des changements environnementaux brutaux ou de basse intensité (écologie, climat, disponibilité des ressources, pathogènes...) ayant induit mécaniquement ou volontairement les déplacements des espèces humaines et non-humaines ? Les causes pourraient-elles être aussi comportementales (mode de dispersion, de compétition intra ou inter-spécifiques, de construction de niche), bio-culturelles (pandémies, famines...) ou, pour *Homo sapiens*, socio-économiques et culturelles (guerre, discriminations...) ?

Pour répondre à ces questions sur la causalité des migrations, il faudra, là encore, construire de nouvelles interdisciplinarités et élaborer de nouvelles méthodes. En effet, l'étude des migrations liées entre différentes espèces/populations juxtaposent en général les résultats de ces recherches menées séparément pour chaque espèce/population. Ces juxtapositions permettent de faire émerger de nouvelles hypothèses, notamment sur les causes possibles conjointes ou disjointes de ces co-migrations, mais ne sont pas à même de les tester formellement. Pour cela il s'agirait d'intégrer les modèles théoriques et développer de nouvelles méthodes permettant d'étudier les co-migrations conjointement à partir de différents types de données, et en combinant des processus de migration différents selon les objets étudiés (Verdu, 2022). Construire de tels cadres unifiés permettrait de produire des attendus qu'il sera possible de confronter aux données réelles, afin de tester formellement les occurrences passées de co-migrations et les relations causales entre ces événements.

Enfin, un enjeu scientifique majeur pour les disciplines impliquées dans l'étude des phénomènes migratoires est de produire des prédictions sur l'évolution biologique ou génétique des espèces et des écosystèmes, ou des évolutions culturelles humaines, et ce sous l'effet de différentes modalités de migrations. Ces approches prédictives de l'effet des migrations sur les diversités biologique et culturelle futures posent des défis scientifiques majeurs, nécessitant de nouvelles mobilisations interdisciplinaires entre mathématiques, informatiques, sciences de la vie et de l'évolution, et sciences qualitatives humaines et sociales. Ces défis seront également porteurs de nombreuses perspectives de sciences appliquées et de sciences en société, notamment permettant de mieux comprendre et anticiper l'influence possible de nos changements de comportements et modalités de mobilité sur la biodiversité. Une telle compréhension nous permettra de mieux guider certains choix de sociétés pour faire face aux enjeux de la crise climatique et pour répondre aux crises économiques, énergétiques et sociales.

## Verrous à lever

Tout d'abord, afin de promouvoir les interactions entre disciplines, il est nécessaire de partager un langage commun. Ainsi, selon les disciplines, le terme « migration » central à nos questions de recherche correspond à différentes définitions. Il en est de même pour les échelles de temps et

d'espace. Les approches multi-échelles des migrations humaines et non humaines impliquent des besoins variés pour réaliser l'interdisciplinarité : concepts, temporalités, méthodes d'analyses (avec des coûts variés) et moyens humains différents.

### Leviers scientifiques, techniques et opérationnels

Il est ressorti de l'atelier plusieurs propositions pour faciliter les échanges et promouvoir les interactions entre disciplines. Il s'agit de promouvoir collectivement :

- les études comparatives sur le temps long qui permettent de promouvoir les interactions entre recherches menées dans différents environnements (ex. marin/terrestre) et sur différents phylums (ex. eucaryotes et procaryotes), ou encore entre populations aux pratiques culturelles différentes au sein d'un même environnement ;
- le développement d'approches prédictives nécessitant des mobilisations interdisciplinaires entre mathématiques, informatiques, sciences de la vie et de l'évolution, et sciences qualitatives humaines et sociales ;
- les terrains communs qui permettent d'ancrer et de stimuler cette interdisciplinarité, en France comme à l'étranger. (ex. Zones ateliers, ZA) ;
- l'interdisciplinarité « en action » comme, par exemple, la combinaison de connaissances scientifiques et de savoir-faire anciens pour travailler sur des problématiques sociétales actuelles, y compris via des projets de sciences participatives (Vila *et al.*, 2022) ou, par exemple, en favorisant le développement et l'intégration des thématiques des migrations dans les Observatoires Hommes-milieus (OHM) ;
- les Sciences en société en valorisant les études sur les migrations par leur médiation auprès des grands publics et des décideurs.

### Moyens à fournir

Les échanges entre participants ont fait ressortir les nécessités suivantes :

- augmenter les crédits récurrents pour initier les projets mais aussi pour les mener à bien, avec moins de contraintes de temps, et diversifier les façons de faire de la recherche ;
- faciliter l'accès, et à moindre coût, à des plateformes de production de données omiques, et à de moyens computationnels (stockage données + calculs) ;
- augmenter les financements de terrains prospectifs interdisciplinaires, visites inter-labos, réseaux thématiques (plusieurs possible) ;
- développer des appels à projets à financements intermédiaires (type Emergence), ni trop petits ni trop grands (comme ANR et ERC), mais qui permettent de financer également des ressources humaines (salaires, indemnités de stage, vacations) ;
- alléger les outils (administratifs, financiers, scientifiques) de coopération et de partenariat à l'international (notamment en tenant compte des situations de conflit internationaux) :
  - faciliter les transferts de moyens et le soutien aux activités de recherche des collaborateurs sur le terrain ;
  - mettre en place de nouvelles formes de collaborations et partage de données et de matériaux entre scientifiques ;
  - renouveler la confiance entre les praticiens de la recherche et les administrations en

promouvant une recherche plus ouverte, plus intégrée, plus responsable et plus éco-responsable.

- Valoriser les projets de terrains et des chantier écoles pour plus d'interdisciplinarité ;
- Promouvoir les postes disciplinaires ayant une approche audacieuse et une grande

prise de risque pour un brassage interdisciplinaire en action : affecter par exemple des historiennes et historiens dans des laboratoires d'agroécologie ou de bio-archéologie. Il pourrait également s'agir d'instituer des rattachements multiples des scientifiques à plusieurs unités de recherche.

## Messages clés

L'histoire des migrations, qui s'enracine dans le temps long à des échelles spatiales extrêmement variées, a montré l'enjeu majeur qu'elles représentent dans le remodelage permanent de la biodiversité, des cultures et des sociétés.

L'étude des migrations permet donc de mesurer les impacts anthropiques au cours du temps

et dans l'espace, et les réponses sociétales et environnementales à ces phénomènes.

Comme les migrations des espèces ne se font jamais seules, il faut prendre en compte les interactions dans leur complexité pour comprendre les changements évolutifs, écologiques et culturels majeurs induits par tout événement de migration.

## RÉFÉRENCES

Contributions aux Perspectives de CNRS Écologie & environnement, 2023, La Rochelle :

- Allassonnière-Tang, M., Lundgren, O., Robbers, M., Cronhamn, S., Larsson, F., Her, O-S., Hammarström, H., & Carling, G. (2022). L'importance de la migration humaine et de la diffusion par contact sur la diversité linguistique et son évolution : exemple des systèmes de classification nominale.
- Atlan, A. (2022). La colonisation vue par les plantes : les ajoncs autour du monde.
- Boisserie, J-R., Guy, F., & Grohé, C. (2022). Apport du temps profond.
- Déroit, F., & Grimaud-Hervé, D. (2022). Les peuplements humains en Asie du sud-est insulaire sur le temps long : Java, Flores et Luzon.
- Grouard, S., Tomadini, N., & Durocher, M. (2022). Migrations humaines et impacts sur les peuplements vertébrés insulaires : exemple de l'archéozoologie aux Petites Antilles depuis 6000 ans.
- Lesur, J. (2022). La diffusion de l'élevage en Afrique du nord-est et son impact sur des environnements changeants et fragiles.
- Manni, F. (2022). Prédire la circulation géographique du COVID avec les dialectes et les noms de famille : une étude préliminaire concernant l'Espagne et la France.
- Mashkour, M., Brisset, E., & Rhoné-Que, C. (2022). « Silk Roads », a highway of migrations in Eurasia. New prospects from bioarcheology and paleoecology.
- Mesfin, I., Oslisly, R., & Benjamim, M-H. (2022). Premiers peuplements humains de l'Afrique centrale, une Préhistoire au fil de l'eau.

- Pagnoux, C., Mattered, V., & Ruas, M-P. (2022). Plantes exotiques : herbiers et jardins comme objet d'étude de leur acclimatation et de leur conservation.
- Prat, S. (2022). Les premières occupations hors du continent africain : tempo et modalités de dispersion/migration.
- Rougeron, V., & Prugnolle, F. (2022). Les migrations humaines comme empreintes de l'histoire évolutive des pathogènes.
- Salavert, A., Bouchaud, C., & Dabrowski, V. (2022). Les plantes comme marqueur des migrations humaines et des dynamiques d'échanges sur le temps long.
- Sankiana Malankanga, G. (2022). Changements environnementaux dus aux migrations pastorales de masse dans la partie nord-est de la RD Congo.
- Valero, M., Faugeron, S., Mauger, S., Destombe, C., & Guillemin, M. L. (2022). Migrations humaines et non humaines dans l'histoire récente d'une algue rouge.
- Verdu, P. (2022). Enjeux théoriques et méthodologiques de l'étude des migrations, hybridations et métissages en génétique des populations.
- Verdu, P., Mashkour, M., & Valero, M. (2022). Perspectives CNRS Écologie & Environnement 2022 – Introduction Atelier Migrations humaines et impacts sur l'environnement non-humain.
- Viard, F., & Bierné, N. (2022). Les espèces non-indigènes et leurs gènes parcourent le monde mais les conséquences évolutives de ce melting-pot d'origine anthropique restent encore à explorer.
- Vila, E., Mashkour, M., & Lesur, J. (2022). L'âne, premier véhicule de l'homme.





# Agroécologie & choix alimentaires : pratiques, impacts et temporalités

Auteurs : Samuel Rebulard (Université de Paris Sud), Julien Blanc (EA), Margareta Tenberg (EA), David Giron (IRBI), Joan Van Baaren (ECOBIO)

Contributeurs : Léo Mariani (Eco-Anthropologie), Vincent Battesti (EA), Véronique Zech-Matterne (AASPE), Aurélie Cebron (LIEC), Stéphane Boyer (IRBI), Jonathan Filee (EGCE), Josette Garnier (Métis), Gilles Billen (Métis), Christophe Bressac (IRBI), Elisabeth Herniou (IRBI)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Déterminer les meilleurs types d'enrichissement de la biodiversité végétale sur différentes cultures de façon à maximiser les services écosystémiques dans différents types de climats et paysages
- ▶ Intégrer les études sur le microbiote aux études sur l'enrichissement en biodiversité végétale, pour une action au niveau de la croissance des plantes (levier agricole), et aux études sur les régimes alimentaires et la santé humaine (pour aider à une transition écologique)
- ▶ Promouvoir de nouveaux aliments : de la production à la consommation, en intégrant l'adaptation au changement climatique

## Introduction

Les questions de recherche majeures en Agro-écologie trouvent des réponses à travers l'association de plusieurs disciplines au cœur de CNRS Écologie & Environnement pour y répondre, dont l'écologie, l'évolution, l'économie et la sociologie. Il s'agit d'une approche interdisciplinaire des systèmes alimentaires et des agroécosystèmes, de leurs transformations passées et à venir.

Lors des prospectives de 2017, l'atelier « Agro-écologie » était principalement basé sur les sciences écologiques – au sens large, c'est-à-dire articulant écologie et évolution – mises au service d'une meilleure caractérisation du fonctionnement du vivant au sein des agroécosystèmes et d'une capacité d'expertise, notamment liée à une montée en puissance de la modélisation. L'agroécologie y était définie comme un changement de paradigme de l'agriculture intensive visant à concilier durablement les objectifs environnementaux à travers la mise en exergue des services écosystémiques rendus par la biodiversité (ex. biocontrôle, fertilité des sols, pollinisation...) et les objectifs socio-économiques.

Pour ces nouvelles prospectives, l'atelier a été intitulé « Agroécologie, alimentations et environnements », avec pour objectifs de maintenir des sciences écologiques et évolutives et d'ouvrir sur d'autres regards et approches, d'accentuer la proposition de « prendre les trois termes dans leurs relations » et d'assumer une perspective largement exploratoire. L'objectif sous-jacent est de « *stimuler des communautés de recherche qui sont restées jusqu'ici à la marge de cette thématique, notamment parce que sa formulation et ses enjeux, tels qu'ils sont aujourd'hui posés, ne sont pour eux que difficilement saisissables* ». En particulier, l'atelier

avait pour vocation d'interpeller les biologistes travaillant sur les microbiotes, les plantes, les ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels, ainsi que les historiens de la modernité ou des temps plus anciens, les archéobotanistes et archéologues, anthropologues, sociologues, économistes, philosophes ou spécialistes de l'innovation comme des sciences de l'éducation (liste non-exhaustive) pour qu'ils viennent interroger les enjeux de transitions agroécologiques pour une alimentation durable, très présents aujourd'hui dans le débat public, s'exprimer sur comment leurs travaux et réflexions pourraient les faire avancer, et proposer de nouvelles questions.

Les enjeux actuels de l'agroécologie nécessitent un changement en profondeur sur la façon d'analyser, d'évaluer et de concevoir l'agriculture, des systèmes de production aux choix des consommateurs. Ces changements majeurs exigent de passer à des systèmes à construire par les acteurs eux-mêmes et à décliner dans chaque contexte pédoclimatique et socio-économique. Ces nouveaux systèmes doivent intégrer différentes échelles spatiales, de la parcelle à l'exploitation agricole jusqu'au territoire (paysage, systèmes alimentaires, maîtrise des flux et impacts sur les ressources), en direction d'une alimentation en constante évolution.

Durant ces prospectives, 3 thèmes majeurs ont été répertoriés :

- enrichissement de la biodiversité végétale et services écosystémiques ;
- microbiote ;
- nouveaux aliments : production et consommation.

## Enrichissement de la biodiversité végétale et services écosystémiques, transition agroécologique

### État de l'art

Deux modalités d'enrichissement de la biodiversité végétale, soutenant la conservation de la biodiversité des terres agricoles et la fourniture des services écosystémiques associés, consistent à augmenter la complexité du paysage grâce à la diversification de l'habitat, et la diversité végétale au sein des éléments du paysage local. Une diversité végétale accrue à ces différentes échelles fournit des ressources alimentaires (pollen/nectar, proies/hôtes), des sites d'hivernage, des sites de ponte et des abris à la biodiversité bénéfique (pollinisateurs, ennemis naturels des ravageurs des cultures et des graines d'aventices) (Gurr *et al.*, 2017). Par exemple, de plus en plus d'études suggèrent que les ennemis naturels des ravageurs des cultures sont capables de remplacer partiellement les pesticides mais, pour être efficaces, ils doivent être présents dans les cultures avant ou arriver au plus tard en même temps que les ravageurs (Damien *et al.*, 2017). Cela peut être amélioré en conservant et en réintroduisant une végétation non cultivée à proximité des cultures (Redlich *et al.*, 2018), ou en augmentant la complexité des paysages cultivés ou non cultivés (Bianchi *et al.*, 2017). Par conséquent, la réintroduction, la conservation et la gestion des sites non cultivés dans les paysages agricoles devraient représenter des aspects clés de la PAC\*. Cependant, sur la base des connaissances actuelles, l'augmentation de la diversité végétale dans les zones agricoles a eu des effets variables sur les services écosystémiques, soit car cela n'a pas eu d'effet direct sur la biodiversité à l'origine du service écosystémique considéré, soit par le fait que cette biodiversité a effectivement augmenté, mais sans se traduire par une amélioration des services écosystémiques associés ; par exemple, dans le cas de la lutte contre les insectes ravageurs cette absence d'effet peut résulter de l'augmentation simultanée des populations d'ennemis naturels, mais autant de celles des insectes ravageurs (Karp *et al.*, 2018, Albrecht *et al.*, 2020). Cette imprévisibilité quant au succès de la méthode est en partie à l'origine d'un faible taux d'adoption/appropriation par les agriculteurs. Certaines

explications avancées pour expliquer ce manque de cohérence dans les résultats sont à ce jour :

- les différentes méthodes d'augmentation de la biodiversité végétale (cultures intercalaires, ajout de haies et de bandes fleuries...) ont été considérées de manière indépendante, et l'impact de la gestion conjointe de plusieurs infrastructures linéaires reste mal connu ;
- dans la plupart des études, seule l'échelle du champ est considérée.

Cependant, il convient également de considérer le contexte à plus grande échelle (macroclimat, paysage) car les infrastructures vertes peuvent également interagir en opposition ou en synergie avec l'hétérogénéité paysagère (configuration ou composition du paysage) et peuvent avoir un effet différent selon les conditions spécifiques des zones climatiques (Tougeron *et al.*, 2022). Ceci peut représenter un enjeu pour une transformation de la PAC, incluant un soutien au niveau du paysage plutôt qu'au niveau de l'exploitation agricole. Cependant, des synergies entre la gestion conjointe du contrôle des ravageurs et des mauvaises herbes et la pollinisation peuvent également apparaître, ce qui représente un domaine de recherche innovant (Carbonne *et al.*, 2021). La gestion conjointe de plusieurs services écosystémiques nécessite de comprendre les mécanismes sous-jacents aux interactions entre les services écosystémiques (Jeavons *et al.*, 2023 ; Tougeron *et al.*, 2018 ; Allan *et al.*, 2014).

## Questions futures

Les prospectives ont permis de mettre en évidence 3 questions de recherche futures.

La première porte sur l'analyse comparative des différents types d'enrichissements, comme les bandes fleuries, les bandes enherbées, les cultures mixtes ou l'agroforesterie (Figure 1). À l'échelle de la parcelle, il est nécessaire de se pencher sur les espèces à associer. Les recherches récentes mettent en évidence l'intérêt de penser ces associations en termes de diversité fonctionnelle ou phylogénétique plutôt que de « simple » diversité spécifique. Il est aussi possible de considérer l'enrichissement sur une échelle temporelle, en modifiant les rotations, avec, en général, une évolution vers des rotations sur un plus grand nombre d'années. Il apparaît aussi de plus en plus que les types d'enrichissement doivent se réfléchir, non plus à l'échelle de la parcelle, mais à celle du paysage et l'interaction entre les différentes échelles spatiales représente aussi une piste de recherche prometteuse. Cela nécessitera de développer des méthodes de quantification des effets, ainsi que des outils socio-économiques pour les mettre en œuvre. La déclinaison future de ces méthodes d'enrichissement se fera en tenant compte des conditions pédo-climatiques et paysagères de chaque parcelle, ou idéalement de chaque entité écologique, car l'incertitude actuelle sur le suc-

cès des méthodes a mis en évidence la nécessité de devoir désigner les mélanges végétaux (destinés à l'enrichissement végétal) le plus possible en adéquation avec les écologies plus larges dans lesquelles ils seront insérés.

Une seconde question porte sur la nécessité d'ouvrir le sujet de l'enrichissement à d'autres services écosystémiques, c'est-à-dire de s'intéresser aux synergies et aux antagonismes possibles entre services écosystémiques, comme ceux qui sont produits dans le sol, au-dessus du sol (biocontrôle, pollinisation) et ceux qui vont au-delà de la parcelle (cynégétique, aménités paysagères...) (Figure 2).

Un troisième champ de recherche met en évidence la nécessité de prendre en compte la diversité des situations et de l'assumer. Les pratiques ou stratégies de diversification (enrichissement végétal par exemple) ne seront pas les mêmes dans les modèles agricoles bas intrants versus hauts intrants ; il en va de même des leviers à mettre en œuvre pour accélérer, consolider, favoriser et déclencher les transitions agro-écologiques. Les recherches, qu'elles soient en écologie fondamentale et appliquée ou en

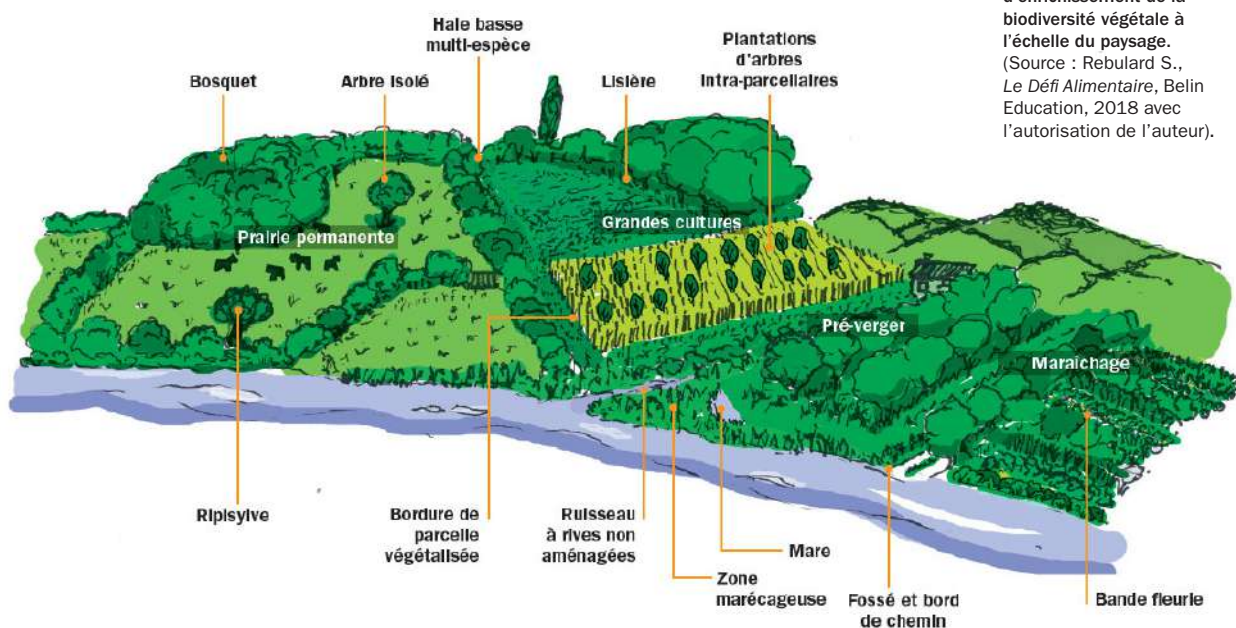


Figure 1.  
Diversité des éléments semi-naturels d'enrichissement de la biodiversité végétale à l'échelle du paysage. (Source : Rebulard S., *Le Défi Alimentaire*, Belin Education, 2018 avec l'autorisation de l'auteur).



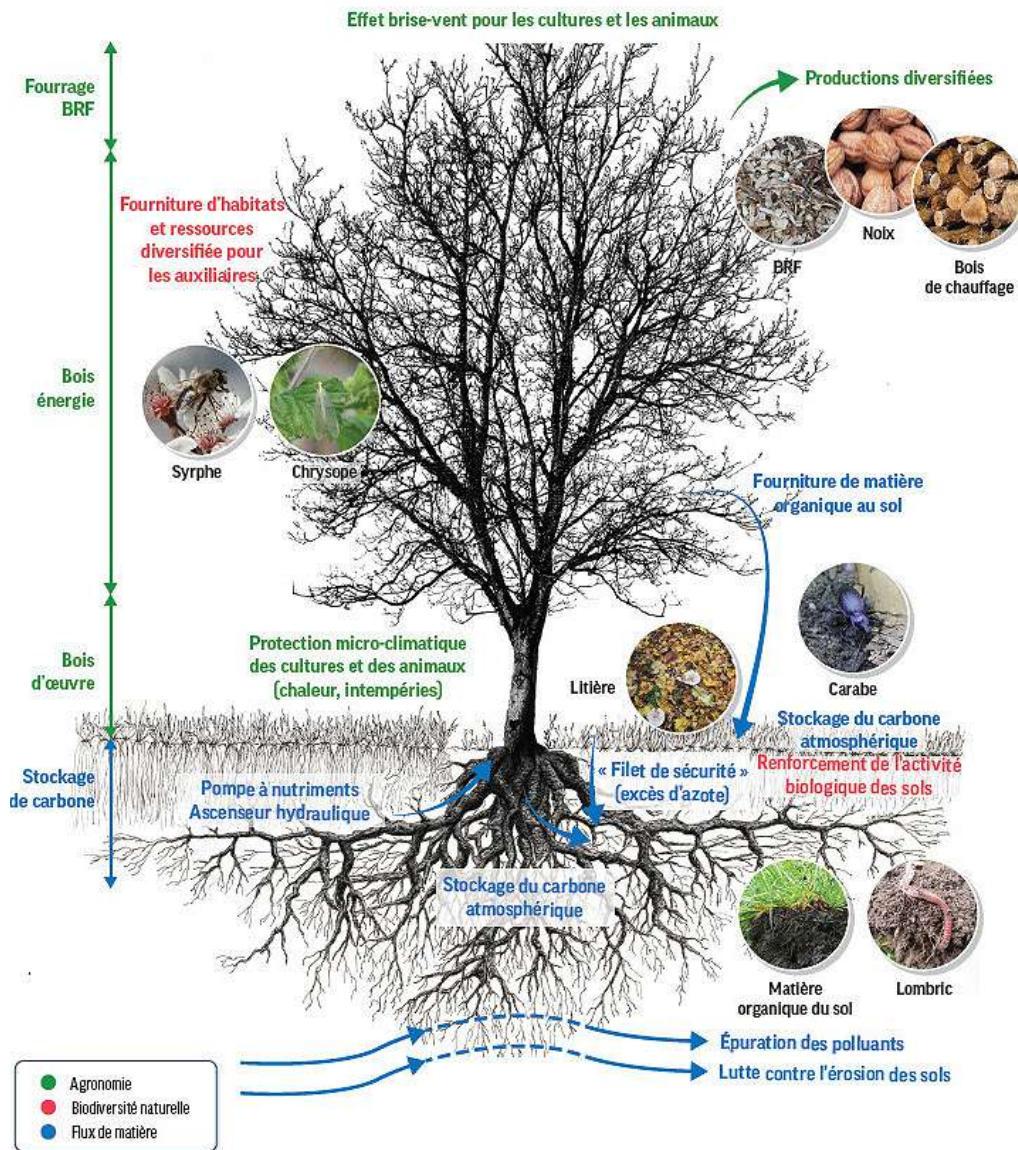


Figure 2. Fonctions des arbres associés à d'autres productions agricoles. (Source : Rebulard S., *Le Défi Alimentaire*, Belin Education, 2018 avec l'autorisation de l'auteur).

sciences humaines et sociales doivent prendre en compte cette diversité et en explorer la viabilité socio-économique.

Les recherches futures se doivent d'explorer la possibilité de partager les risques liés aux changements vers la transition écologique sur le plan social. Il faut recenser et développer ce que les agriculteurs peuvent avoir à leur disposition pour gérer ces risques, comme par exemple une caisse de compensation sur les risques liés au passage à l'agroécologie. Des recherches sont aussi nécessaires sur les circuits de distribution car au niveau sociétal, il serait possible d'accep-

ter plus de pertes avant récolte en limitant les pertes existant après récolte, mais cela nécessiterait de répartir les pertes à toutes les échelles de la production dans la parcelle à la vente des produits dérivés.

## Verrous

Les travaux en cours portent sur certaines échelles en particulier (parcelle ou paysage notamment) et comportent déjà un certain nombre de difficultés d'évaluation des pratiques d'enrichissement végétal - artificiel ou spontané – sur la dynamique des agroécosystèmes, et cela est d'autant plus évident quand ces recherches portent sur le temps long. De fait, un des verrous majeurs est la façon de mettre en place des méthodes d'évaluation de l'enrichissement végétal dans des systèmes en mouvement extrêmement rapides et imprévisibles (rotations culturales, changement d'assolement, de projet de production...). Il sera nécessaire de concilier ces possibilités d'évaluation à la fois sur le plan scientifique et aussi sur le niveau de l'ingénierie. Une des pistes serait une évaluation au niveau du paysage au lieu du niveau de la parcelle, mais l'enjeu serait de développer de nouveaux indicateurs.

Une seconde difficulté porte sur les prévisions sur le temps long, car il est nécessaire en particulier d'anticiper l'adaptation ou la résilience au changement climatique. De plus, le changement climatique va entraîner une forte augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements imprédictibles, ce qui rend encore plus complexe les prédictions à long terme.

Une troisième difficulté porte sur la réalisation des expériences à l'échelle du paysage car la plupart des expériences actuelles se font à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, bien que les effets à l'échelle du paysage soient maintenant bien connus. Du point de vue des sciences humaines et sociales, la prise de déci-

sion des acteurs agricoles se fait généralement à l'échelle de leur exploitation, mais il faudrait des prises de décision à des échelles plus larges. Le type de gestion peut aussi avoir un impact sur le succès de la méthode entraînant des difficultés à adopter une même méthode par plusieurs acteurs différents.

En agroforesterie, pour les agroforestiers qui se convertissent, l'augmentation de rendement ne peut être perceptible qu'au bout de 10 à 15 ans, mettant en évidence le problème du temps nécessaire aux changements de pratiques. Il faut accepter une perte surfacique ou de rendement sur le court terme pour espérer observer les effets positifs sur le long terme.

Enfin, au moment où les solutions scientifiques commencent à émerger, il est nécessaire de modifier les règles socio-économiques et juridiques pour les faire adopter à large échelle. Les verrous dans ce domaine sont nombreux et se posent tout d'abord en termes d'acceptabilité par les agriculteurs et de traductions des résultats scientifiques en décisions publiques. Cela nécessite de développer des recherches permettant de prendre en compte les externalités négatives des modes de production, et de considérer les problèmes individuels qui peuvent s'élever lors de l'adoption de grandes orientations favorables à l'intérêt général. Il sera aussi nécessaire de proposer des assurances permettant de maîtriser les risques dans le cadre de changement de système de production. Enfin, il faut prendre en compte le fait que le droit de l'environnement intervient toujours après les autres.

## Moyens pour les lever

Parmi les moyens d'action, nous pouvons en relever sur les protocoles d'étude, la nécessité de développer l'interdisciplinarité et les sciences participatives...

Tout d'abord, il est possible d'étudier les réponses des communautés sur des gradients climatiques d'échelle continentale. Ceci permet d'observer les réactions d'un même système de production dans différents climats, ainsi que l'efficacité des solutions de diversification végétale, afin qu'elles

soient efficaces dans différents contextes climatiques. Des outils existent pour développer ces méthodes à des échelles au-delà des exploitations, dont les outils de collaborations internationales proposés par CNRS Écologie & Environnement (IRP, IRN...) et ses zones ateliers sur le territoire français, les fermes DEPHY, les plateformes (CA-SYS) qui permettent aux chercheurs de travailler en collaboration sur des zones différentes à une grande échelle spatiale. Il convient également d'intégrer l'ensemble des données climatiques



à des échelles pertinentes pour les organismes responsables des services écosystémiques. Les processus étudiés doivent ainsi intégrer les perturbations du microclimat et leurs conséquences.

Il est néanmoins nécessaire de créer de nouveaux indicateurs qualitatifs et quantitatifs de la biodiversité dans les zones agricoles, et en particulier des indicateurs prenant en compte un ensemble de taxons assurant différents services écosystémiques, permettant ainsi d'évaluer l'efficacité de ces services écosystémiques. Ces indicateurs ne peuvent être déclinés à larges échelles de temps et d'espace que s'ils impliquent les sciences participatives, afin de collecter plus largement des données exploitables.

Le développement de l'interdisciplinarité est une solution majeure pour lever les verrous décrits précédemment. En effet, favoriser des pratiques plus écologiques, diversifier les productions et enrichir les agrosystèmes du point de vue de leur écologie, passe par des actions humaines orchestrées à de multiples échelles et dans une grande diversité d'arènes. Les prises de décisions sont le fait d'agriculteurs et leur engagement au titre d'individu dans ces dynamiques est déterminant. Il est ainsi crucial de mieux comprendre ce qui les motive comme ce qui les freine dans leurs engagements vers des modes de production plus vertueux du point de vue environnemental et de la santé humaine. Développer des travaux visant à mieux comprendre non seulement les motivations mais les systèmes de contraintes dans lesquelles ils pratiquent leur activité est ainsi crucial pour mieux comprendre les voies possibles du changement. Ces développements sont possibles par les livings-labs, une approche de co-construction des systèmes de production à des échelles supérieures à celle de l'exploitation et impliquant des sciences participatives. En effet, l'agriculture n'est pas le fait d'individus isolés. Les agriculteurs s'inscrivent dans différents réseaux qui forment le cadre de leurs activités et influent fortement sur leurs comportements, motivations et pratiques : coopératives, filières, collectifs de pairs, acteurs non agricoles du territoire, accompagnement agricole, syndicats, consommateurs... Il est important de mieux comprendre aujourd'hui comment fonctionnent ces différentes modalités d'insertion de l'activité agricole dans le paysage agroalimentaire

territorialisé ou non français et les perspectives et marges de manœuvre qu'offrent ces différentes modalités d'insertion. Les transformations de la gouvernance de la fabrique agricole (des gouvernances pour des agricultures en fait) s'inscrivent dans la continuité et sont également de grande importance, tout comme l'évaluation des politiques publiques et des cadres normatifs qui, attachés à cette activité, tendent à entraver, ou au contraire, pourraient faciliter les dynamiques de transitions agroécologiques.

Cette approche d'intégration des diversités rappelle l'importance des approches systémiques de l'innovation dans les travaux sur les systèmes alimentaires. La question se pose alors d'intégrer dans cette démarche des acteurs et des réflexions dont les motivations pour instaurer des pratiques agroécologiques peuvent paraître éloignées des convictions scientifiques. Il s'agit à la fois d'intégrer la diversité d'acteurs dans le domaine et d'apprendre à accueillir les différences pour profiter de la diversité d'expertises, y compris très anciennes, en matière d'agroécologie.

De ce fait, les agrosystèmes doivent évoluer vers des socio-agrosystèmes, impliquant l'économie et le droit. Il s'agit de développer un volet socio-culturel complexe comprenant le droit des assurances. En effet, il apparaît important de mieux identifier les différents systèmes d'assurance (privés ou collectifs) qui se développent aujourd'hui pour faire face à l'incertitude et aux risques : des assurances privées aux fonds mutuels en passant par des systèmes contractuels de commercialisation répartissant les risques entre les différents acteurs de la filière. Plus largement, il semble important de mieux comprendre comment les différents acteurs de l'agriculture et de l'alimentation, publics comme privés, agriculteurs comme distributeurs ou consommateurs ou acteurs du territoire, prennent aujourd'hui en charge cette question de l'incertitude et celle concomitante de la résilience.

En conclusion, la stratégie de conservation de la diversité végétale, indispensable pour concilier le nécessaire maintien de la biodiversité et de la production d'une quantité suffisante d'aliments, et cela dans le contexte du changement climatique, nécessite de trouver des leviers politiques et économiques basés sur des transferts de connaissances associant les populations concernées.

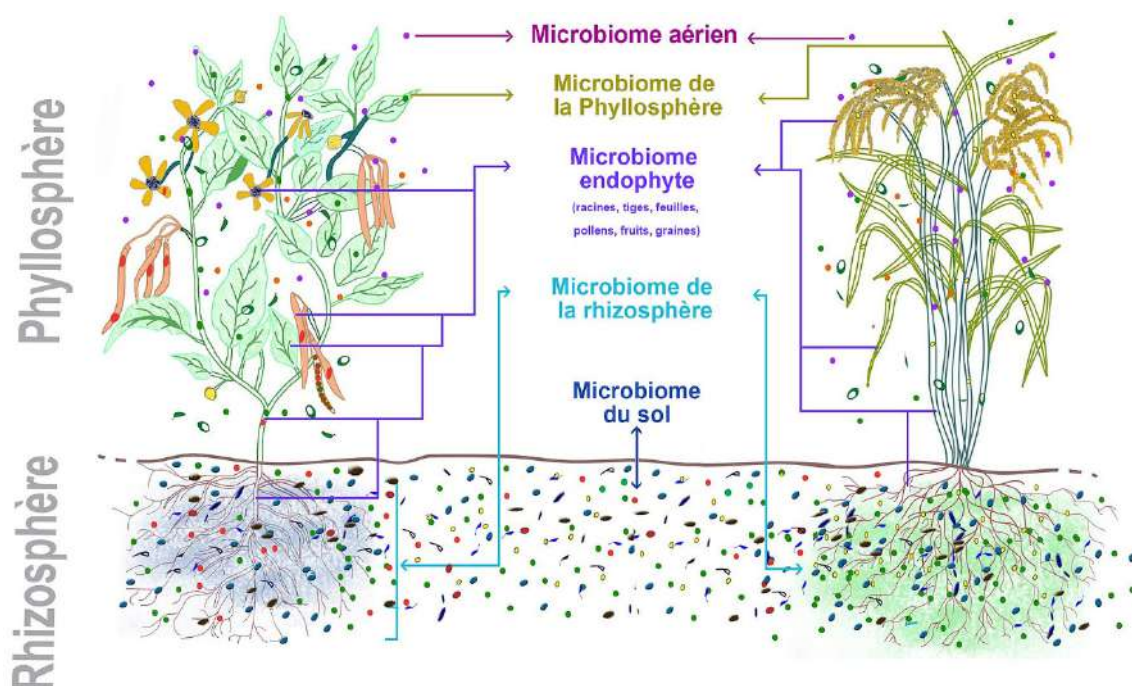
## Microbiote

### État de l'art

Malgré l'importance prise ces dernières années dans les questions de recherche, le microbiote, associé aux macro-organismes d'intérêt agronomique (plantes cultivées, champignons, animaux d'élevage, y compris les animaux aquatiques et les insectes) est encore assez mal connu, notamment dans ses fonctionnalités (Girard *et al.*, 2022 ; Müller *et al.*, 2016) (Figure 3). Pourtant de nombreux résultats montrent l'importance de prendre en compte ces microbiotes notamment pour ses conséquences physiologiques sur les macro-organismes et les performances agronomiques qui en résultent (Girard *et al.*, 2022 ; Giron *et al.*, 2017 ; Engel & Moran, 2013). Certains secteurs industriels proposent depuis quelques années des offres reposant sur les microbiotes (semences de plantes cultivées enrobées de microorganismes, conservation dans l'industrie agroalimentaire...), d'autres les ciblent directement comme perspectives prioritaires (probiotiques dans l'élevage des insectes) (Hossain *et al.*, 2017 ; de Souza Vendenberghe *et al.*, 2017). Dans d'autres domaines (écloserie pour la conchyliculture par exemple), on observe toujours des pratiques de stérilisation, témoignant d'une vision strictement négative de l'interaction avec les micro-organismes.

Les microbiotes ont des origines multiples (sol, semences, environnement d'élevage au sens large, transferts horizontaux entre organismes) et peuvent être influencés par la dynamique des communautés qui les composent, par les macro-organismes eux-mêmes (métabolites secondaires chez les plantes) et les pratiques humaines (travail du sol, phytosanitaires, enrichissements volontaires, apports de probiotiques...) (Müller *et al.*, 2016 ; Tkacz & Poole, 2015 ; Girard *et al.*, 2022). Ces facteurs peuvent durablement modifier les microbiotes (leur composition, leur fonctions) ou, au contraire, avoir des effets à court terme. Pour aborder cette complexité, le concept d'hobionte, s'il demande d'être davantage défini, constitue un niveau d'organisation du vivant encore souvent oublié et pourtant déterminant (Simon *et al.*, 2019).

**Figure 3.**  
Illustration de la diversité des « compartiments » micro-environnementaux du microbiote des plantes.  
(Source : Murali Gopal & Alka Gupta, Licence CC BY-SA 4.0, Wikimedia commons).



## Questions futures

Un premier ensemble de questions de recherche concerne la caractérisation des microbiotes. Si l'on sait aujourd'hui identifier les individus composant les communautés, au moins par les études de métagénomiques, on dispose souvent de très peu d'informations fonctionnelles. Ceci est particulièrement vrai lorsque les communautés ont une forte diversité spécifique. Les études de métatranscriptomiques demandent de connaître les fonctions des gènes exprimés. Intégrer et caractériser les fonctionnalités à l'échelle macroscopiques du microbiote (notamment vis-à-vis des macro-organismes associés ou de l'environnement) est un enjeu majeur de compréhension agronomique de leur rôle et de leur importance. Ces caractérisations doivent inclure une meilleure compréhension de la redondance fonctionnelle réelle ou apparente entre les composantes des microbiotes. Les liens structurels et fonctionnels entre les différents microbiotes d'un même organisme (racines, feuilles, nectar, endomicrobiote chez les plantes par exemple) et leurs interactions avec les microbiotes de l'environnement (réservoir du sol en particulier, organismes ravageurs mais également auxiliaires), doivent être mieux caractérisés. Les interactions entre les différents microorganismes (transferts de gènes horizontaux, complémentarités métaboliques, effets antagonistes ou synergiques) doivent également être mieux connus. Ces facteurs peuvent jouer sur la dynamique propre des communautés microbiennes. De façon plus générale, ces études doivent incorporer de manière plus significative les concepts et théories de l'écologie des communautés.

Par ailleurs, cette dynamique des communautés microbiennes (et par conséquent la modification de fonctions du microbiote) est elle-même soumise à des facteurs externes, en particulier anthropiques, qu'il conviendrait de mieux caractériser. Chez les plantes cultivées par exemple, plusieurs dimensions demandent à être mieux connues :

- l'influence réciproque du microbiote de la flore spontanée (y compris mais pas seulement des plantes introduites, éventuellement invasives) sur celui des plantes cultivées ;

- les liens entre l'écologie végétale et celle du sol, ce qui nécessite une meilleure intégration de la microbiologie du sol et de la microbiologie de l'holobionte ;
- les interactions entre le microbiote des plantes et celui des organismes auxiliaires et ravageurs ;
- les modalités et l'importance du façonnage par la plante elle-même (en particulier fonctionnellement) de son microbiote (exsudats, métabolites secondaires...) ;
- les conséquences des pesticides sur les communautés microbiennes et la capacité de résilience des communautés microbiennes après une perturbation, voire une éradication :
- les conséquences de l'introduction de microorganismes exogènes (de pré- et de pro-biotiques) sur les communautés microbiennes présentes et les conséquences environnementales potentielles ou avérées de ces holobiontes modifiés (voire génétiquement appauvris).

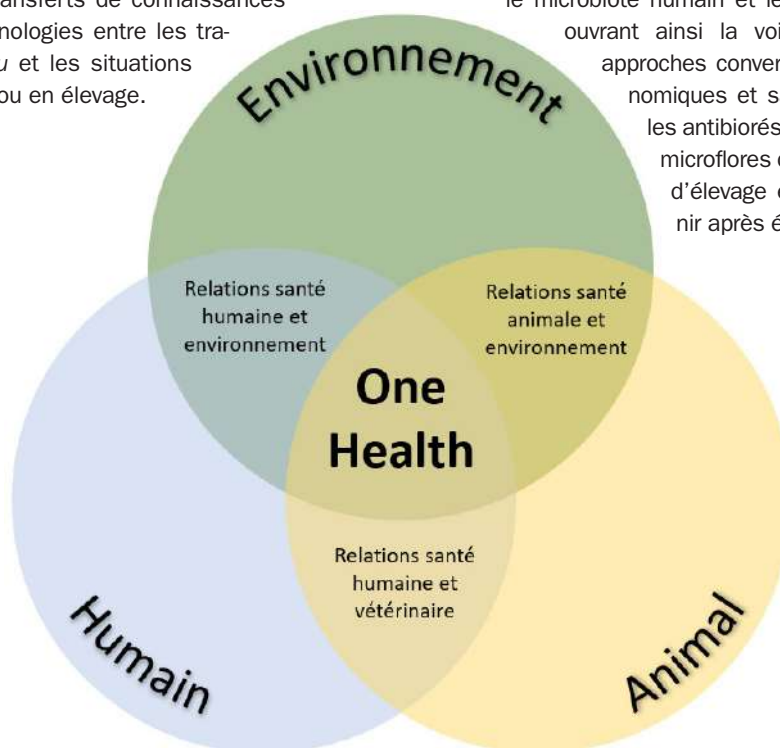
Ces questions peuvent être transposées dans les élevages, par exemple chez les insectes, pour comprendre la dynamique de développement de leur microbiote pendant les différentes phases de développement (et les conséquences zootechniques et physiologiques, notamment immunitaires).

Les questions de recherches en lien avec l'ingénierie des systèmes microbiens associés aux macro-organismes constitue un autre ensemble conséquent. Par exemple, les travaux de sélection variétale végétale, de lignées d'insectes et de souches microbiennes doivent davantage considérer l'holobionte dans son environnement. Il s'agit à la fois d'identifier des couples (ou associations de plus de deux partenaires) apportant les fonctions attendues et de caractériser les risques associés à leur déploiement (écotoxicologie, stress induits, appauvrissement génétique, conséquences pour les organismes spontanés présents...). Dans les plantes, certains travaux de l'industrie s'intéressent déjà aux interactions entre le microbiote du sol, celui des bioagresseurs et la physiologie de la plante. Des produits déjà commercialisés prétendent

agir sur plusieurs facteurs clefs tels que l'architecture racinaire des plantes, le rendement ou la défense systémique. Il est nécessaire de réduire le fossé entre recherche académique et applications. Le développement d'une vision holistique et pluridisciplinaire mettant en relation l'état des connaissances sur les microbiotes avec les pratiques agronomiques les affectant négativement, l'ingénierie microbienne s'appuyant sur quelques fonctions sélectionnées, et les propositions commerciales à l'efficacité incertaine. Cela pose bien entendu des questions de transferts de connaissances et de technologies entre les travaux *ex-situ* et les situations au champ ou en élevage.

Les relations entre les microbiotes d'intérêt agronomique et la santé animale et humaine sont un autre champ identifié de questions de recherche. L'approche holobionte doit s'insérer dans les réflexions du concept *One Health* (Figure 4) en incluant les questions de santé animale et de santé humaine auxquelles les sciences humaines et sociales doivent être associées. Ces sujets transversaux touchant aux microbiotes agronomiques concernent en particulier les effets cascades dans les écosystèmes (organismes ravageurs ou auxiliaires), ainsi que leurs interactions avec le microbiote humain et les zoonoses, ouvrant ainsi la voie vers des approches convergentes agronomiques et sanitaires sur les antibiorésistances, les microflore des effluents d'élevage et leur devenir après épandage.

Figure 4. Diagramme représentant le concept *One Health* et l'approche interdisciplinaire qui en découle. (Figure réalisée par les animateurs de l'atelier).



### Verrous et moyens pour les lever

La prise en compte des microbiotes d'intérêt agronomique intéresse de très nombreuses disciplines. Une approche pluridisciplinaire est nécessaire pour relever les défis de compréhension, les défis technologiques ainsi que les défis réglementaires et juridiques. Cette interdisciplinarité devra également enrichir l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires de modifications anthropiques directes ou indirectes des microbiotes.

La diversité, la complexité et la dynamique des microbiotes rend leur étude fonctionnelle *in situ* particulièrement délicate. Il y a de forts enjeux

à faire le lien entre les observations en milieu contrôlé et les observations en conditions réelles *in naturae*. La capacité à connaître les fonctions macroscopiques des microbiotes pour les agroécosystèmes devra elle aussi bénéficier d'une approche interdisciplinaire et s'ancrer durablement dans une vision d'écologie des communautés.

Enfin, la question de l'optimisation des modalités de circulation des savoirs entre les acteurs de la recherche, ceux de la santé, les industriels et les opérateurs/producteurs des agroécosystèmes doit être posée.

## Nouveaux aliments : production et consommation

### État de l'art

Les questionnements sociétaux sur l'avenir de l'alimentation sont nombreux et s'intéressent tout à la fois à l'optimisation des utilisations des ressources (sols, eaux, agrobiodiversité, réduction des pertes et gaspillage), à la réduction des impacts environnementaux (changement climatique, perte de biodiversité, érosion des sols, pollutions), à la satisfaction des besoins nutritionnels et des attentes de consommateurs majoritairement urbains (Walter Willet *et al.*, 2019).

Les évolutions contemporaines de la production alimentaire tendent vers des systèmes où le nombre de facteurs de production contrôlés est

croissant (productions hors-sol, hors-saison, de synthèse) et éloigné de l'influence des facteurs naturels. Une part importante de l'alimentation est constituée d'aliments ultra-transformés (27 % de l'énergie alimentaire consommée en Europe) (Monteiro *et al.*, 2019 ; Mertens *et al.*, 2022) dont les impacts négatifs, tant au niveau environnemental que sanitaire sont aujourd'hui questionnés (Monteiro *et al.*, 2019 ; Fardet & Rock, 2020).

La place des « nouveaux aliments » dans les systèmes alimentaires contemporains pose de nombreuses questions, aussi bien agronomiques, environnementales que sanitaires.

### Questions futures

Un premier ensemble de questions se pose sur la définition de ce que sont les nouveaux aliments. Si la réglementation européenne considère comme nouvel aliment (*novel food*) tout aliment qui n'était pas consommé dans l'Union européenne avant 1997 (Règlement européen CE n°258/97), force est de constater que la notion de « nouvel » aliment est une notion relative dans l'espace (un aliment nouveau localement peut être consommé dans d'autres régions du monde depuis des millénaires) et dans le temps (des aliments autrefois consommés ont pu être oubliés). Dans le présent atelier, ont été mentionnés comme nouveaux aliments la viande de synthèse, des produits de la pêche minotière, des plantes nouvellement cultivées en Europe, des aliments et ingrédients alimentaires à base d'insectes (farines en particulier) et les aliments et ingrédients alimentaires à base de spiruline.

Beaucoup de questions touchent à la production de ces aliments. En ce qui concerne la production d'insectes (Figure 5), les réflexions agronomiques, mais aussi sociologiques et d'innocuité des modes de production sont très différentes selon qu'il s'agisse de collecte en milieu naturel, d'élevages domestiques ou d'élevages industriels. Ce dernier mode étant celui qui est le plus représenté en

France. Cette industrialisation repose sur des élevages d'insectes à forte concentration, monospécifiques et homogènes génétiquement. Ce qui suppose une gestion des effluents, la prise en compte du risque d'échappement (éventuellement massif) et d'hybridation avec les populations sauvages (déjà avérés), ainsi que la vulnérabilité aux pathogènes consécutive à la faible variabilité génétique et à la promiscuité nécessitant de fait le recours à des produits vétérinaires (antibiotiques) pouvant sélectionner des résistances. L'alimentation des insectes d'élevage, si elle peut être réalisée sur des coproduits et des déchets issus de l'agriculture et de l'industrie alimentaire, repose pour l'essentiel sur des productions agricoles dédiées. En effet, les élevages d'insectes sur fumier ne peuvent être réalisés que pour des usages non alimentaires de protéines. Se pose d'ailleurs le problème de contamination dans la chaîne alimentaire (métaux lourds, polluants...), et de pathogénicité en cas d'utilisation de substrats non dédiés. On retrouve finalement pour ces nouvelles productions animales, les mêmes problématiques agronomiques et environnementales que pour les autres élevages : origine et modes de production du fourrage, conséquences sanitaires de l'homogénéité génétique et de la concentration des animaux, gestion des effluents...





Figure 5. Différents insectes issus d'élevage et de prélèvements en milieu naturel vendus sur un marché de la communauté Naxi à Lijiang (Yunnan, Chine). (© S. Rebulard, 2018)

En ce qui concerne les viandes de synthèse, les éléments aujourd'hui disponibles ne permettent pas d'évaluations environnementales. Celles-ci dépendront en effet des options industrielles retenues pour la réalisation des substrats de cultures cellulaires, la réduction des coûts de production et les conditions de maintien de la stérilité sur les sites de production. Une généralisation de la consommation de viande de synthèse posera la question de la disparition des élevages semi-extensifs et de ses conséquences (économie rurale, paysages, biodiversité associée, cycles de l'azote et des minéraux).

S'agissant de nouvelles productions, quel encadrement (diffusion de bonnes pratiques, réglementation) permettrait d'éviter de reproduire des impacts négatifs similaires aux productions existantes ? La plus petite taille des sites de production et leur dispersion géographique permettrait de limiter les coûts mais s'oppose aux économies d'échelle sur les coûts de production. L'évaluation du coût de revient complet (incluant l'ensemble des externalités négatives, y compris l'impact sanitaire et environnemental) est donc nécessaire. Une approche multicritère (holistique) des conséquences environnementales (modification de la biodiversité, écotoxicologie des communautés...) sera nécessaire et reposera sur l'enrichissement des paramètres environnementaux et posera la question de leur mesurabilité.

Sur le plan de la consommation et de l'utilisation, les recherches sur les nouveaux aliments doivent prendre en compte les alimentations particulières des consommateurs (aspects nutritionnels, culturels, sociologiques). En particulier, se pose la question des conséquences sanitaires (nutritionnelles notamment) de chan-

gements majeurs et rapides de régimes alimentaires dans une population.

L'évolution des régimes alimentaires suppose une évolution des productions agricoles associées. Dans le cas d'une généralisation, par exemple, du régime méditerranéen, quelles possibilités d'extension vers le nord de cultures typiquement méditerranéennes (comme les oliviers) sont envisageables/souhaitables à grande échelle, en particulier dans un contexte de changement climatique ? Ces sujets touchent notamment à l'innovation variétale, l'adaptation des cultures et des pratiques agricoles, les conséquences sur les espaces semi-naturels associés et les paysages.

La compréhension de la modification de la consommation alimentaire repose sur des thématiques nombreuses traitées par les sciences humaines et sociales. L'acceptabilité (et la pertinence) de l'entomophagie (insectes frais, cuits, comme ingrédients) là où elle est aujourd'hui absente pourrait être modifiée par la meilleure connaissance de l'entomophagie historique. En tant que nouvel aliment, les insectes rappellent les questions de consommation qui se posent pour les algues : faible acceptabilité malgré une pertinence agronomique et nutritionnelle. Les insectes en France sont aujourd'hui utilisés pour l'alimentation animale de volailles et poissons. Dans l'hypothèse d'un développement important, se pose la question de la concurrence avec les autres sources protéiques (soja par exemple).

Un certain nombre d'obstacles à l'innovation alimentaire existent même dans un contexte de changements environnementaux rapides. C'est



le cas de certaines formes de labellisation et de signes de qualité qui fixent des modalités de production figées dans le temps, empêchant toute évolution. La question de l'accessibilité

au plus grand nombre et la place de l'innovation alimentaire dans un contexte d'insécurité alimentaire (sous ses différentes formes) reste posée (Figure 6).



Figure 6. Vue générale des questions de recherche abordées, organisées par grandes étapes du système alimentaire. (Figure réalisée par les animateurs de l'atelier)

### Verrous et moyens pour les lever

D'une façon générale, c'est principalement la nécessité de créer les modalités d'un travail de recherche interdisciplinaire sur la question de l'alimentation qui a été soulevée. La vision holistique des chercheurs en écologie de CNRS Écologie & Environnement pourrait utilement être associée aux travaux menés sur les pratiques alimentaires anciennes et sur les nombreuses transitions alimentaires survenues au cours du temps. Cette intégration entre écologistes et humanités doit également nécessairement s'accompagner de collaborations avec les économistes, et ouvre

la voie à des perspectives de coopérations au sein de CNRS Écologie & Environnement, avec d'autres instituts du CNRS et d'autres organismes de recherche. Il est apparu nécessaire de faire de l'alimentation un objet agrégatif de recherche au sein de CNRS Écologie & Environnement et de réaliser une synthèse des thématiques traitées et une cartographie des unités travaillant sur l'alimentation au sein de l'institut. La mise en place d'outils collaboratifs tels qu'une école thématique inter-instituts ou un réseau thématique semblent être nécessaires.

## Conclusion

En conclusion, les trois sous-ateliers de cette prospective sur l'agroécologie, bien qu'abordant des aspects très différents, se rejoignent sur les besoins d'études interdisciplinaires, en particulier en lien avec les sciences humaines et sociales, et la considération de l'agriculture de la production à l'alimentation ou de la fourche à la fourchette. Les études sur le terrain, tout en continuant à expérimenter au niveau de la parcelle sur les différents types d'enrichissement végétaux, se doivent maintenant de considérer à la fois :

- le compartiment du microbiote : avec d'une part l'impact de l'environnement sur le microbiote et d'autre part, l'impact du microbiote sur la production agricole et les interactions entre ces deux processus afin de développer l'ingénierie de l'holobionte,
  - le compartiment des organismes (biodiversité animale et végétale présentes dans les parcelles) et compartiment du paysage.
- Ces études doivent tenir compte du changement climatique par des études faites sur de

grands gradients permettant d'une part, de dissocier les effets du paysage et du climat sur les services écosystémiques, et d'autre part, d'adapter les mesures d'enrichissement à différents contextes pédo-climatiques actuels et futurs. Ces études sur le terrain doivent se coupler avec la transformation de cette production dans nos assiettes en différents types d'aliments, et prendre en compte l'évolution de nos régimes alimentaires dans le contexte de sobriété énergétique, nécessaire à la sauvegarde de la biodiversité et à l'atténuation du changement climatique, ainsi qu'à l'adaptation des espèces cultivées aux nouvelles conditions climatiques. Enfin, les aspects socio-économiques ne peuvent être laissés de côté, car les changements en agriculture impliquent

la mise en place de solutions pour permettre aux agriculteurs de réussir cette transition écologique.

C'est aussi probablement en combinant les recherches issues de ces trois sous-ateliers qu'il sera possible d'arriver à un changement de paradigme. En effet, la transition agroécologique vers une agriculture durable nécessitera un changement majeur dans l'alimentation. Les recherches sur le microbiote pourront d'une part nous aider à améliorer la production en agissant sur les plantes cultivées, mais les études sur le microbiote humain, en lien avec notre alimentation, pourront aussi probablement être des leviers pour nous aider dans ce changement majeur d'alimentation.

## RÉFÉRENCES

- Albrecht, M., Kleijn, D., Williams, N. M., Tschumi, M., Blaauw, B. R., Bommarco, R., Campbell, A. J., Dainese, M., Drummond, F. A., Entling, M. H., Ganser, D., Arjen de Groot, G., Goulson, D., Grab, H., Hamilton, H., Herzog, F., Isaacs, R., Jacot, K., Jeanneret, P., ... Sutter, L. (2020). The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: A quantitative synthesis. *Ecol. Let.*, 23(10), 1488–1498. DOI 10.1111/ele.13576
- Allan E., Bossdorf, O., Dormann, C.F., Prati, D., Gossner, M.M., Tschamtko, T., Blüthgen, N., Bellach, M., Birkhofer, K., Boch, S., Böhm, S., Börschig, C., Chatzinotas, A., Christ, S., Daniel, R., Diekötter, T., Fischer, C., Friedl, T., Glaser, K., Hallmann, C., Hodac, L., Hölzel, N., Jung, K., Klein, A.M., Klaus, V.H., Kleinebecker, T., Krauss, J., Lange, M., Morris, E.K., Müller, J., Nacke, H., Pasalic, E., Rillig, M.C., Rothenwöhler, C., Schall, P., Scherber, C., Schulze, W., Socher, S.A., Steckel, J., Steffan-Dewenter, I., Türke, M., Weiner, C.N., Werner, M., Westphal, C., Wolters, V., Wubet, T., Gockel, S., Gorke M, Hemp A, Renner SC, Schöning J, Pfeiffer S, König-Ries B, Buscot F, Linsenmair KE, Schulze E.D., Weisser, W.W., Fischer, M. (2014). Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A*, 111(1):308-13. DOI 10.1073/pnas.1312213111.
- Bestion, E., Jacob, S., Zinger, L., Di Gesu, L., Richard, M., White, J., Coté, J. (2017) Climate warming reduces gut microbiota diversity in a vertebrate ectotherm. *Nat. Ecol. Evol.*, 1, 0161. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0161>
- Bianchi, F.J.J.A., Walters, B.J., Cunningham, S.A., Hemerik, L., Schellhorn, N.A. (2017) Landscape-scale mass-action of spiders explains early-season immigration rates in crops. *Landscape Ecol.*, 32:1257–1267. DOI 10.1007/s10980-017-0518-7
- Carbonne, B., Bohan, D.A., Foffová, H., Daouti, E., Frei, B., Neidel, V., Saska, P., Skuhrovec, J., Petit, S. (2021) Direct and indirect effects of landscape and field management intensity on carabids through trophic resources and weeds *J. Appl. Ecol.*, 59 (1): 176-187 DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76305-w>
- Damien, M., Le Lann, C., Desneux, N., Alford, L., Al-Hassan, D., Georges, R., Van Baaren, J. (2017) Change in plant phenology during winter increases pest control but not trophic link diversity. *AGEE*, 247: 418-425. DOI: 10.1016/j.agee.2017.07.015.
- Engel, P, Moran, N.A. (2013) The gut microbiota of insects—diversity in structure and function. *FEMS Microbiol. Rev*, 37(5): 699-735. DOI: 10.1111/1574-6976.12025
- Fardet, A., Rock, E. (2020) Ultra-processed foods and food system sustainability: What are the links? *Sustainability*, 12(15): 6280. DOI: 10.3390/su12156280
- Girard, M., Luis, P, Moro, C.V., Minard, G. (2023) Crosstalk between the microbiota and insect postembryonic development. *Trends Microbiol.*, 31(2):181-196. DOI: 10.1016/j.tim.2022.08.013.
- Giron, D., Dedeine, F., Dubreuil, G., Huguet, E., Mouton, L., Outreman, Y., Vavre, F., Simon, J-C. (2017) Influence of microbial symbionts on plant-insect interactions. In: *Advances in Botanical Research series: Vol 81. Insect-Plant Interactions in a Crop Protection Perspective*, Volume Eds Sauvion, N., Calatayud, P.A., Thiéry, D. Elsevier, GBR, pp. 225-257. DOI 10.1016/bs.abr.2016.09.007
- Gurr, G.M., Wratten, S.D., Landis, D.A., You, M. (2017) Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annu. Rev. Entomol.*, 62: 91–109. DOI: 10.1146/annurev-ento-031616-035050
- Hossain, M.I., Sadekuzzaman, M., Ha, S.D. (2017) Probiotics as potential alternative biocontrol agents in the agriculture and food industries: A review. *Food research international*, 100: 63-73. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.07.077
- Jeavons, E., Le Lann, C., van Baaren, J. (2023) Interactions among beneficial arthropods: combining ecological theory with agroecological management. In press *Entomologia generalis*
- Karp, D.S., Chaplin-Kramer, R., Meehan, T.D., Martin, E.A., DeClerck, F., Grab, H, ... & Wickens, J.B. (2018) Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 115(33), E7863-E7870. DOI: 10.1073/pnas.1800042115
- Mertens, E., Colizzi, C., Peñalvo, J.L. (2022) Ultra-processed food consumption in adults across Europe. *European J. Nutrition*, 61(3): 1521-1539. DOI: 10.1007/s00394-021-02733-7
- Monteiro, C.A., Cannon, G., Lawrence, M., Costa Louzada, M.L., Pereira Machado, P (2019) Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. Rome, FAO.
- Monteiro, C., Cannon, G., Levy, R., Moubarac, J., Louzada, M., Rauber, F., . . . Jaime, P (2019) Ultra-processed foods: What they are and how to identify them. *Public Health Nutrition*, 22(5), 936-941. DOI:10.1017/S13688980018003762.
- Müller, D.B., Vogel, C., Bai, Y., Vorholt, J.A. (2016) The plant microbiota: systems-level insights and perspectives. *Annu. Rev. Genet.*, 50(1) : 211-234. DOI : 10.1146/annurev-genet-120215-034952
- Rebulard, S. (2018) *Le défi alimentaire, Ecologie, Agronomie, Avenir*. Belin Education. 528 pp.
- Redlich, S., Zhang, J., Benjamin, C., Dhillon, M.S., Englemeier, J., Ewald, J., Fricke, U., Ganuza, C., Haensel, M., Hovestadt, T., Kollmann, J., Koellner, T., Kübert-Flock, C., Kunstmann, H., Menzel, A., Moning, C., Peters, W., Riebl, R., Rummier, T., Rojas-Botero, S., Tobisch, C., Uhler, J., Uphus, L., Müller, J., Steffan-Dewenter, I. (2018) Disentangling effects of climate and land use on biodiversity and ecosystem services—A multi-scale experimental design. *J Appl Ecol.*, 55:2419–2428. DOI : 10.5445/IR/1000140542.
- Simon, J.C., Marchesi, J.R., Mougel, C., Selosse, M.A. (2019) Host-microbiota interactions: from holobiont theory to analysis. *Microbiome*, 7(1) : 1-5. DOI : 10.1186/s40168-019-0619-4
- Porto de Souza Vandenbergh, L.P, Garcia, L.M.B., Rodrigues, C., Camara, M.C., de Melo Pereira, G.V., de Oliveira, J., Soccol, C.R. (2017) Potential applications of plant probiotic microorganisms in agriculture and forestry. *AIMS microbiology*, 3(3): 629. DOI: 10.3934/microbiol.2017.3.629
- Tkacz, A., Poole, P (2015). Role of root microbiota in plant productivity. *J. Exp. Botany*, 66(8): 2167-2175. DOI: 10.1093/jxb/erv157
- Tougeron, K., Couthouis, E., Hecq, F., Barascou, L., Baudry, J., Boussard, H., Burel, F., Couty, A., Doury, G., Francis, C., Le Roux, V., Marrec, R., Pétilion, J., Spicher, F., Hance, T., van Baaren, J. (2022) Where and when the biological control service can be maximized? *STOTEN*, 822, 153569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153569
- Tougeron, K., Damien, M., Le Lann, C., Brodeur, J., van Baaren, J. (2018) Changes in host-parasitoid communities over the years in cereal crops of Western France: Does climate warming matters? *Front. Ecol. Evol*, 6:173. DOI: 10.3389/fevo.2018.00173.
- Willet, W. et al., (2019) Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 393(10170):447-492. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31788-4.



# Santé & environnement

Auteurs : Audrey Bergouignan (IPHC), Florence Debarre (IEES), Ana Rivero (MIVEGEC), Elodie Robert (LETG)

Contributeurs : Enguerran Macia (ESS), Sylvie Massemin (IPHC), Claire Lajaunie (LPED), Serge Morand (MIVEGEC), Natacha Kremer (LBBE), Karen McCoy (MIVEGEC), Florence Debarre (IEES), Laure Temine (CNAM)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Comprendre les mécanismes génétiques, moléculaires et physiologiques qui sous-tendent l'évolution des pathogènes (virulence, résistance) et des hôtes (immunité, tolérance), ainsi que les effets des changements anthropiques sur les émergences de pathogènes (sauts d'hôtes)
- ▶ Rechercher les liens entre socio-écosystèmes et maladies chroniques non infectieuses
- ▶ Mettre en place des suivis à long terme sur la santé des populations et faciliter l'accès à des grandes bases de données existantes tout en développant des outils de gestion, analyse, modélisation et interprétation des données

## Introduction

Sur la période la plus récente de l'Anthropocène, l'accroissement rapide et important de la population humaine, l'intensification de la mondialisation, l'accélération des progrès scientifiques, techniques et numériques, l'industrialisation, les changements dans l'exploitation des milieux continentaux, littoraux et marins et les modifications climatiques ont entraîné des changements environnementaux rapides et marqués (Steffen *et al.*, 2015). Tous provoquent des variations du mode de vie de tous les organismes, hôtes ou pathogènes, ainsi que leur circulation. Les facteurs de risques englobent aussi bien les facteurs liés au mode de vie (chez les humains : facteurs sociologiques tels que stress, conditions de travail, activités physiques, sédentarité, alimentation...) que les

facteurs environnementaux externes (polluants, particules fines, radiations, perturbateurs endocriniens, antibiotiques, pesticides, bruit, facteurs climatiques...) et internes (métabolisme, flore intestinale, inflammation, stress oxydant). Leurs conséquences sur le développement des maladies chroniques non transmissibles, comme sur l'évolution des cortèges de pathogènes, sont loin d'être négligeables.

Le but de l'atelier « Santé & environnement » était d'identifier les futures pistes et priorités de recherche qui permettront de mieux comprendre l'interaction des facteurs génétiques et environnementaux sur les déterminants de la santé humaine, animale et végétale, et ainsi mieux les anticiper et les prévenir. L'atelier a été structuré autour de sept axes thématiques.

## Socio-écosystèmes en transition et maladies humaines non-infectieuses

### État des lieux

L'avancée en âge des populations humaines et les problèmes de surpoids – conséquences d'un processus général incluant industrialisation, globalisation, urbanisation – constituent les facteurs de risque principaux de nombreuses maladies dites chroniques non transmissibles (maladies cardio-vasculaires, maladies respiratoires, certains cancers...) qui affectent toutes les sociétés (OMS\*, 2022).

Les maladies humaines non infectieuses étant de nos jours les premières causes de mortalité dans le monde, il apparaît fondamental de mieux comprendre leur développement afin de limiter leur fardeau, à la fois dans les pays dits développés, et aussi dans les pays dits en développement où il s'ajoute à celui des maladies infectieuses (Figure 1).

Que savons-nous des liens entre socio-écosystèmes et maladies non infectieuses ? Comment les appréhendons-nous dans nos champs respectifs ? Ces questions sont abordées à travers trois grandes approches. Certains chercheurs travaillent préférentiellement sur les détermi-

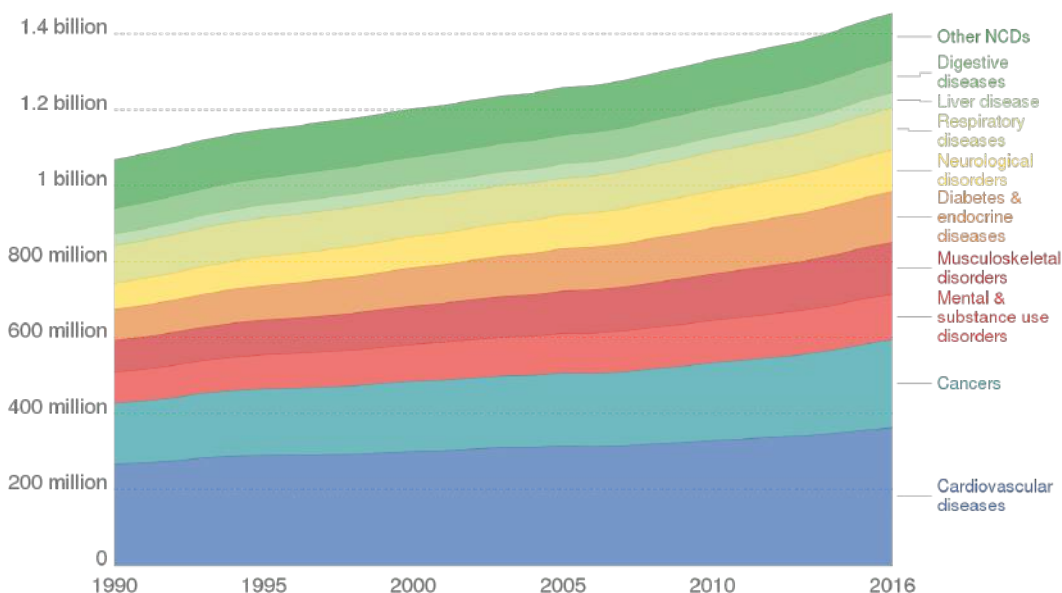
nants sociaux et culturels des maladies non infectieuses : inégalités sociales, impact des politiques publiques, représentations du corps, manières de manger... D'autres chercheurs privilégient une approche davantage centrée sur les caractéristiques bio-physico-chimiques du socio-écosystème et ses conséquences sanitaires : contaminants liés aux productions industrielles, pollution de l'air, du sol, de l'eau, disponibilité des ressources naturelles. Enfin, depuis quelques années, les recherches au croisement des sciences de l'environnement et des sciences humaines et sociales se développent également : politiques et actions de conservation, interactions hommes-faune sauvage, métabolisme urbain...

Le défi qui nous attend pour les années à venir est d'articuler de manière cohérente ces trois grands champs interdisciplinaires au sein d'une approche *One Health* cohérente, appliquée aux maladies non contagieuses, et permettant d'approcher la complexité des interactions entre environnement, santé et sociétés.



## Disease burden from non-communicable diseases, World

Total disease burden from non-communicable diseases (NCDs), measured in DALYs (Disability-Adjusted Life Years) per year. DALYs are used to measure total burden of disease - both from years of life lost and years lived with a disability. One DALY equals one lost year of healthy life.



Source: IHME, Global Burden of Disease

### Questions futures

- Une première piste de recherche aurait pour point de départ l'étude d'une pathologie particulière. Il s'agirait de caractériser ses potentiels déterminants bio-psycho-socio-environnementaux et de les analyser empiriquement sur un terrain précis. Ce type d'études permettrait d'expliquer la prévalence et l'incidence des pathologies bien au-delà des variances pour l'instant expliquées (dans le cas de pathologies aux déterminants complexes comme l'hypertension artérielle, l'une des premières causes de mortalité au monde).
- Une deuxième piste de recherche consisterait, de manière très différente, à considérer le territoire comme porte d'entrée d'une approche complexe, en réalisant des enquêtes bio-psycho-socio-environnementales exploratoires sur des territoires bien définis afin d'analyser finement le socio-écosystème et les pathologies des populations y évoluant.

#### Verrous à lever :

Les Observatoires Hommes-Milieus (OHM) constituent des outils du CNRS particulièrement adaptés à ce type d'approches exploratoires favorisant grandement la sérendipité.

Figure 1.  
Les maladies chroniques non transmissibles (NCDs) sont à l'origine de près des trois quarts des décès dans le monde chaque année.  
© Wikimedia Commons

- Une troisième piste consisterait à étudier les socio-écosystèmes favorables à la santé et au bien-être subjectif des individus (Butler 2018). Ce renversement de paradigme nous enjoindrait à définir et caractériser, théoriquement comme empiriquement, un socio-écosystème et des individus « sains » et à comprendre ce qui constitue réellement le *One Health*, alors que cette approche reste paradoxalement centrée sur les maladies, malheurs ou catastrophes.

#### Verrous à lever :

Cette piste de recherche apparaît potentiellement disruptive, mais nécessiterait la création d'un *International research network* (IRN) focalisé sur cette question afin de faire émerger des définitions, des théories et des approches méthodologiques adaptées.

- Enfin, une dernière piste – non exclusive des précédentes et sans doute les englobant théoriquement – consisterait à opérationnaliser



## Questions futures

- Etude de l'exposome. Une cartographie nationale des données environnementales doit être établie pour une optimisation de leur utilisation par différents laboratoires de recherche. Une standardisation de la récolte des données à venir est un prérequis indispensable pour la robustesse des résultats. Afin de prendre en compte l'effet multifactoriel de l'exposome, nous avons besoin de mener des études avec une approche multi-sites soumis à différents facteurs pour une espèce donnée, de prendre en compte l'effet cocktail *in natura* ainsi que la résilience des individus exposés à des variables environnementales diverses. Élargir la comparaison des résultats entre ceux obtenus *in natura* (multifactoriel) et en milieux contrôlés permettrait de mieux comprendre les effets des facteurs sur la santé des organismes. Il est aussi proposé de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des expositions et de les étudier à différents niveaux d'intégration (de l'échelle moléculaire, individuelle, communautaire et écosystémique) et suivant le cycle de vie des organismes.

### Verrous à lever :

Il est difficile aujourd'hui de prendre en compte plusieurs facteurs environnementaux de façon concomitante *in natura*. Cela est en partie dû aux limites de la métrologie/instrumentation pour décrire les facteurs environnementaux. Un besoin se fait également sentir en termes de développement ainsi que de postes de biostatisticiens pour l'exploitation/modélisation de ces bases de données. De plus, l'accès aux données déjà existantes demeure problématique.

- Biologie moléculaire des mécanismes épigénétiques. Ces dernières années, nous avons beaucoup progressé dans notre compréhension du rôle de l'épigénétique comme mécanisme sous-jacent à la plasticité phénotypique. Les mécanismes moléculaires sous-jacents restent, cependant, souvent mal explorés. De nombreuses techniques existent aujourd'hui pour aborder ces questions à l'échelle globale des épigénomes (ChIP-Seq, EM-Seq, ATAC-Seq, MeDIP-Seq...) ou d'une manière ciblée pour effectuer des approches fonctionnelles (type Crispr-dCas9). La mise à disposition de toutes

ces techniques de manière généralisée aux chercheurs devrait permettre d'aborder des questions fondamentales concernant le rôle des marqueurs épigénétiques dans les maladies tant infectieuses que non infectieuses. Quel est le lien entre environnement, génétique, épigénétique et phénotype ? Comment se fait la communication de l'information épigénétique du système somatique vers le système germinale pour permettre la transmission transgénérationnelle ? Comment s'effectue la régulation épigénétique à l'échelle unicellulaire ?

### Verrous à lever :

Un premier pas serait de répertorier les ressources techniques, les formations et les compétences disponibles, pouvant être mutualisées, dans le domaine de l'épigénétique (ex. constituer un annuaire des épigénéticiens environnementaux en France). Il est également nécessaire de développer des outils bio-informatiques à grande échelle pour la compilation des données épigénomiques avec les données de l'expression des omics (RNA-Seq, protéomique, métabolomique), les observations sur les phénotypes macroscopiques et les données d'exposome comme cela est mentionné plus haut. Il est à noter enfin que les contraintes éthiques rendent difficile l'utilisation des modèles biologiques vertébrés/céphalopodes pour répondre à ces questions.

## Changements globaux et santé - Enjeux de gouvernance

### État des lieux

Ces dernières années, l'émergence ou la réémergence de maladies infectieuses animales et humaines a été de plus en plus documentée dans le monde entier. Les menaces que représentent les parasites et les agents pathogènes, anciens et nouveaux, sont alimentées par les modifications de l'environnement, de l'agriculture et de la production alimentaire, ainsi que de la démographie humaine. Cet axe porte d'une manière globale sur le lien étroit entre santé humaine, santé animale et santé de l'environnement *One Health* (Figure 3) et, en particulier, sur les facteurs humains qui pèsent lourdement dans l'origine des infections zoonotiques émergentes. Ces problématiques font appel au transfert de connaissances entre multiples disciplines (épidémiologie, écologie, biologie évolutive, parasitologie, cancérologie, toxicologie, océanologie, hydrologie, anthropologie, géographie, urbanisme, politiques publiques, philosophie, économie, droit...) ainsi qu'à des questions d'échelles d'études et du partage des données entre les différents acteurs et territoires concernés (interopérabilité, partage équitable des avantages).

D'un point de vue typologique, on peut distinguer des recherches sur l'impact de l'activité humaine sur la santé des systèmes terrestres : par exemple, le rôle de l'agroforesterie sur la biodiversité, ou encore les mesures et les impacts des pesticides sur les écosystèmes sauvages ou

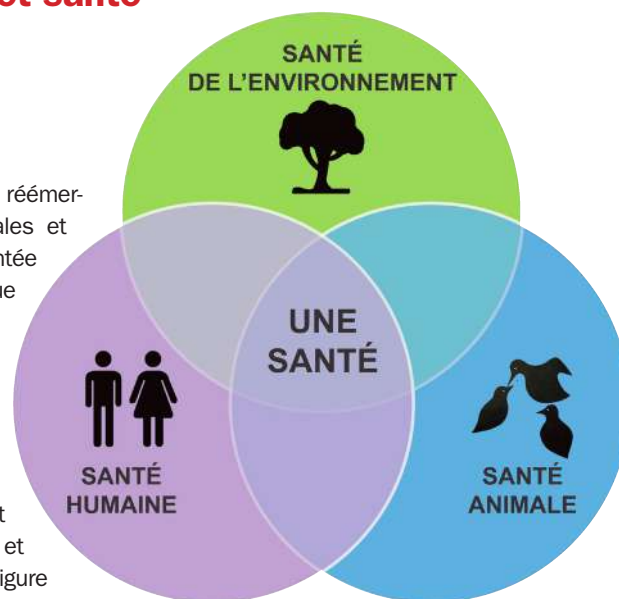


Figure 3.  
La Triade One Health.  
© Wikimedia Commons

de la pollution atmosphérique sur les environnements urbains.

On retrouve les mêmes questions d'intégration des changements globaux en relation avec la santé dans les systèmes d'eaux continentales et les océans : la pollution des systèmes aquatiques, la surveillance des écosystèmes marins et des réservoirs d'agents infectieux, l'apport des aires marines protégées, l'importance des techniques de télédétection pour le suivi de la santé des écosystèmes (zones humides).

### Questions futures

- Les questions de recherche : comment caractériser une méthodologie pour la santé des écosystèmes ? Faut-il développer une analogie avec la santé ? Comment les changements globaux affectent les interactions animal/humain/santé ?
- Les questions sur le dialogue science/politiques publiques (gouvernance) : quelles traductions de la recherche dans les politiques publiques ? Comment élaborer de manière interdisciplinaire les éléments nécessaires à une bonne gouvernance

santé-environnement aux différentes échelles de prise de décision ? Quelle gouvernance responsable promouvoir grâce aux travaux de recherche ?

- Les questions sur le dialogue science/citoyens : comment le citoyen peut-il influencer le politique, et quel rôle pour la recherche ? Comment intégrer les sciences participatives dans la recherche sur la biodiversité et la santé ou systèmes de surveillance (biodiversité locale, perceptions concernant les maladies...) ?

- Les questions sur le financement de la recherche : Comment convaincre les agences de moyens de financer les recherches en santé des écosystèmes ?

**Verrous à lever :**

- Repenser la formulation des politiques publiques pour accompagner l'évolution des socio-écosystèmes : développer des normes et des instruments adaptatifs pour les politiques publiques.
- Évaluer l'impact des atteintes à l'environnement sur la santé humaine et sa quantifica-

tion : développer et quantifier des indicateurs utilisables dans les politiques publiques et règles de droit pour assurer leur suivi.

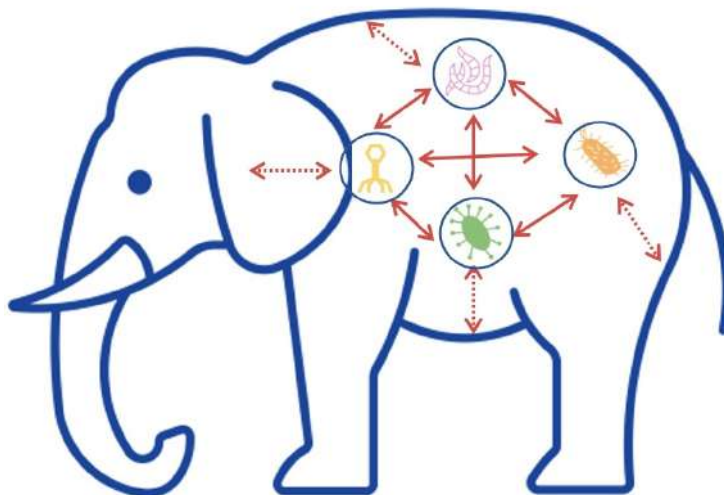
- Assurer l'accès aux données et assurer leur interopérabilité : point capital pour élaborer les indicateurs de suivi des politiques publiques et règles de droit (environnement, santé).
- Changements d'échelles pour la gouvernance pour la mise en œuvre des solutions basées sur la nature : clarifier la relation droit/écologie/science de l'environnement pour faire coïncider certaines échelles de prise de décision.

## L'hôte comme écosystème

### État des lieux

Les interactions symbiotiques, qui incluent tout le continuum entre parasitisme et mutualisme, sont omniprésentes dans la nature. Si elles ont longtemps été étudiées de manière binaire, un nouveau paradigme tend désormais à considérer l'hôte comme un écosystème dans lequel plusieurs symbiotes pathogènes, commensaux et mutualistes, interagissent entre eux, avec des conséquences importantes pour la santé de l'hôte (Brink *et al.*, 2019) (Figure 4). Ceci implique d'étudier chaque symbiote comme

modificateur potentiel du phénotype étendu de l'hôte, mais également de considérer le rôle des interactions symbiotiques dans l'expression de ce phénotype étendu. Ce nouveau paradigme ouvre un questionnement « d'écologie des systèmes », incluant les problématiques d'établissement des communautés, de dynamique des interactions, d'hétérogénéité spatiale et temporelle, de stabilité, de construction de niche..., le tout au sein d'un même hôte (Johnson *et al.*, 2015).



**Figure 4.**  
L'hôte fonctionne comme un écosystème dans lequel plusieurs symbiotes pathogènes, commensaux, et mutualistes interagissent entre eux.  
© A Rivero

## Questions futures

- Il est, tout d'abord, nécessaire de mieux comprendre les questions d'établissement des communautés de symbiotes au sein d'un hôte (ex. règles d'assemblage, détermination des espèces pionnières ou des espèces « clés de voûte ») et de stabilité, puis de transmission de ces communautés.

### Verrous à lever :

La résolution limitée au niveau de la diversité taxonomique et métagénomique, et le manque de prise en compte des flux, des dynamiques spatiales et temporelles, et des phénomènes de compétition, facilitation ou exclusion au sein d'un hôte limitent actuellement leur étude. Ces verrous pourraient être contournés :

- en intégrant des outils d'écologie des communautés ; en développant des réseaux, des modèles multi-échelles ou de théorie des jeux ;
- en manipulant artificiellement le système biologique par la réintroduction séquentielle d'espèces spécifiques ou de dilutions de communautés complexes dans des modèles axéniques (dépourvus de tout symbiote) ou gnotobiotiques (avec des symbiotes spécifiques et connus dans leur entièreté).

- Considérer une communauté de symbiotes soulève également la question du rôle des interactions entre organismes dans l'établissement du phénotype étendu (ex. protection immunitaire croisée, complémentation métabolique multi-partenaires, construction de micro-niches).

### Verrous à lever :

La caractérisation du phénotype étendu à plusieurs partenaires symbiotiques est limitée par des problèmes de résolution en méta-transcriptomique et méta-métabolomique, par la difficulté d'identifier l'origine des métabolites, par la complexité d'intégration des données issues de plusieurs échelles d'étude (ex. transcriptomique, protéomique, métabolomique, fluxomique...) et par les difficultés d'analyse spatiale et de dynamique temporelle. Développer des outils de couplage des modèles taxonomiques et fonctionnels, des méthodes d'intégration des réseaux d'interaction, des méthodes d'analyse multi-omique,

et des outils d'étude de structuration spatiale des communautés en niches permettraient de lever certains de ces verrous. Cependant, il demeure que le nombre d'interactions qu'il est possible d'étudier expérimentalement au sein d'un hôte est limité, et que tous les organismes ne sont pas forcément cultivables. Il serait donc utile de développer en parallèle des modèles expérimentaux simplifiés ou gnotobiotiques (les plus réalistes possible), des jumeaux expérimentaux ou des bioréacteurs.

- Considérer l'hôte comme un écosystème permettrait de mieux comprendre l'adaptation rapide d'un système (hôte + symbiotes) à un changement, d'intégrer les mécanismes de plasticité et de sélection dans la compréhension de cette adaptation rapide, et d'étudier l'influence des stratégies écologiques (ex. symbiote spécialiste vs. généraliste) sur l'évolution de cet écosystème particulier. Ces questions restent encore largement ouvertes, du fait de la complexité à caractériser les dynamiques éco-évolutives intra- et inter-hôte, du nombre rapidement élevé d'interactions possibles, mais également de la difficulté à identifier les marqueurs de plasticité et l'impact des différents niveaux de sélection au sein de l'écosystème hôte (et entre écosystèmes hôtes).

### Verrous à lever :

Le développement de méthodes permettant de mesurer les traits de *fitness* à différentes échelles, et de modèles multi-échelles, d'éco-évolution ou de dynamique adaptative incluant plusieurs partenaires au sein d'un hôte permettraient d'aborder ces questions plus largement.

- Plus généralement, considérer l'hôte comme un écosystème dans un contexte de santé et d'environnement permettrait, par exemple, de mieux comprendre la sensibilité et la réponse des systèmes (hôte + symbiotes) aux changements environnementaux, de mieux appréhender l'évolution de la résistance et de la virulence de pathogènes (ex. covid chez les immunodéprimés), et de développer la médecine personnalisée (notamment au niveau du microbiote intestinal).



## Écologie et évolution des zoonoses/sauts d'hôtes

### État des lieux

Selon l'OMS\*, plus de 30 nouveaux agents pathogènes humains ont été détectés au cours des trois dernières décennies, dont 75 % sont d'origine animale (zoonoses) (Figure 5). L'augmentation du risque de zoonoses est due à des changements dans l'environnement, dans l'agriculture et la production alimentaire, ainsi que dans la démographie humaine (Glidden *et al.*, 2021).

La fièvre de la vallée du Rift, le SRAS, la grippe pandémique H1N, la fièvre jaune, les gripes aviaries (H5N1, H7N9), le virus du Nil occidental et la Covid-19 (SARS-CoV-2) en sont des exemples récents. On estime que les zoonoses sont responsables d'environ un milliard d'infec-

tions et de millions de décès chaque année dans le monde. Par conséquent, comprendre les facteurs génétiques et environnementaux qui déterminent la capacité des agents pathogènes à « sauter » entre différentes espèces d'hôte est d'une importance capitale pour comprendre l'évolution et la diversification des pathogènes et prévoir l'émergence et la propagation de nouvelles maladies infectieuses. Ces sauts d'hôtes ont des conséquences importantes, non seulement pour la santé humaine et des espèces domestiques (animales et végétales), mais aussi pour la conservation de la faune et flore sauvages (Cunningham *et al.*, 2017).

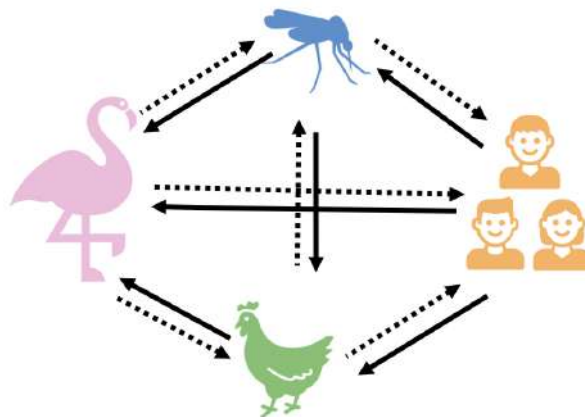


Figure 5.  
Une zoonose est  
une maladie ou  
une infection  
naturellement  
transmissible de  
l'animal à l'homme.  
© A Rivero

### Questions futures

- Les études épidémiologiques sont le plus souvent déclenchées en réponse à une épidémie ou à l'émergence d'une maladie. Il reste alors difficile de retracer les réseaux de transmission et de cerner les facteurs impliqués dans la naissance du processus a posteriori. Il est important de mettre en place des suivis à long terme de réseaux de transmission hors contexte épidémique et dans le cadre de différentes conditions socio-écosystémiques, pour pouvoir identifier les facteurs qui sont impliqués dans le processus d'émergence.

#### Verrous à lever :

- Il n'est pas possible de tout suivre. Une solution serait de privilégier certains sys-

tèmes, et en particulier les milieux insulaires, comme modèle d'étude simplifié, et les zones d'interfaces faune sauvage/faune domestique/humain.

- Les Zones Ateliers (ZA) et Observatoires Hommes-Milieus (OHM) permettent de comprendre et prévoir des émergences, mais il n'y a actuellement pas assez de soutien pour maintenir des études sur le long terme. Il faudrait notamment mettre en place des financements stables (appui technique pour la gestion des programmes sur le terrain et les données associées).

- Il est essentiel de faire des inventaires des pathogènes circulants chez la faune sauvage

afin d'identifier des agents à fort potentiel zoonotique. De même, l'identification d'hôtes réservoirs, notamment ceux qui sont présents en faible prévalence ou intensité avant une épidémie, demeure une priorité. Le spectre d'hôtes est ainsi inconnu pour 20 à 40 % des pathogènes. Pour mieux cerner cette biodiversité et permettre l'identification des agents à fort potentiel zoonotique, il est essentiel de faire des inventaires des organismes circulants chez la faune sauvage.

#### Verrous à lever :

- La complexité d'obtenir des autorisations pour travailler sur le terrain, d'échantillonner, et de transférer des échantillons entre sites, ainsi que la lenteur des procédures administratives (MTA\*, CITES\*, Convention de collaboration, Nagoya...) entravent l'obtention de données.
  - Il existe notamment un problème d'accès aux échantillons et aux données humains, car ils sont largement sous le contrôle des médecins. Mettre à disposition ces données (publiques) à l'ensemble des acteurs de la recherche nous semble essentielle. La création d'une cellule d'aide d'obtention des échantillons humains, y compris dans ses aspects éthiques (modèle Inserm), et d'appui à l'utilisation de bases de données existantes (ex. *Health-data Hub*, *Green Data for Health*, *UK Biobank*) serait également de grande utilité.
  - Dans le but de prédire le risque pour la santé humaine, il est par ailleurs nécessaire de soutenir les efforts de séquençage et d'annotation de génomes pour améliorer les bases de données et les ressources pour l'identification de déterminants de virulence et d'îlots de pathogénicité dans les micro-organismes circulants dans l'environnement.
- Tous les organismes rencontrent régulièrement des pathogènes étrangers, mais seule une petite fraction de ces sauts d'hôtes finit par déclencher une épidémie. Quelles conditions favorisent la colonisation d'une nouvelle espèce hôte et son émergence ? Quelle est la part de l'agent infectieux par rapport au génotype ou phénotype (ex. l'état physiologique) de l'hôte ? Quel rôle jouent les modifications anthropiques dans ces émergences et, notamment, l'homogénéisation de la faune et de la flore dans les systèmes agroalimentaires ? Tandis que la transmission d'agents infectieux depuis la faune sauvage

vers les humains a été, pour des raisons évitantes, fortement étudiée, peu d'études ont évalué le processus de *spillback* (ou rétro-zoonoses) et ses implications pour la dynamique et la conservation de la faune sauvage. Pour répondre à ces questions essentielles, il est primordial d'étudier des zones d'interface entre populations sauvages et domestiques ou entre populations sauvages et humaines.

#### Verrous à lever :

- Ce type de surveillance nécessite de mettre en place des suivis de long terme.
- Pour travailler aux interfaces des écosystèmes, il est nécessaire de développer des programmes transdisciplinaires qui impliquent différents acteurs (ex. naturalistes, écologistes, médecins, vétérinaires, chimistes, informaticiens, sciences sociales - voir « Changements globaux et santé »). Cependant, le contact entre ces acteurs, la compréhension des besoins de chacun et l'investissement en temps nécessaire à la réalisation des projets peuvent constituer une entrave à ce type de recherche. Le recrutement de personnel technique permanent entièrement dédié à la gestion des contacts, à l'instauration de la confiance entre les partenaires et à la façon de mettre à disposition les données pertinentes pour les intérêts de chacun serait très utile.
- Pour observer les points de contact entre les humains et la faune sauvage, il est nécessaire d'investir dans des équipements de *bio-logging* et de télédétection. Ces équipements étant très coûteux, un investissement spécifique serait nécessaire. Ces études demandent également une expertise spécifique pour la gestion et l'analyse des données générées massivement. En revanche, ces données peuvent être rendues publiques rapidement (ex. *MoveBank*) et donc être utilisées dans d'autres domaines d'étude (le comportement animal, l'aménagement du paysage, la production agricole...).
- La surveillance et la détection d'agents pathogènes chez les animaux sauvages présentent plusieurs difficultés importantes (l'échantillonnage des animaux sauvages est coûteux et potentiellement dangereux, difficulté de détection d'agents pathogènes dans des échantillons non invasifs...). Ces dernières années, plusieurs nouvelles technologies ont

été mises au point pour surveiller les agents pathogènes et les toxines chez l'homme (puces microfluidiques, *Lab-on-a-chip*, bio-capteurs portables, nano-capteurs, capteurs basés sur la biologie synthétique...). L'application de ces technologies à la surveillance des agents pathogènes dans la faune sauvage

nous permettrait de suivre l'évolution des agents infectieux en temps réel et de mieux comprendre et potentiellement prédire les émergences et les réémergences. Des financements sont nécessaires pour explorer et développer ces nouveaux outils dans le cadre de collaborations interdisciplinaires.

## Covid-19, quelles leçons pour la suite ? Quel rôle pour CNRS Écologie & Environnement ?

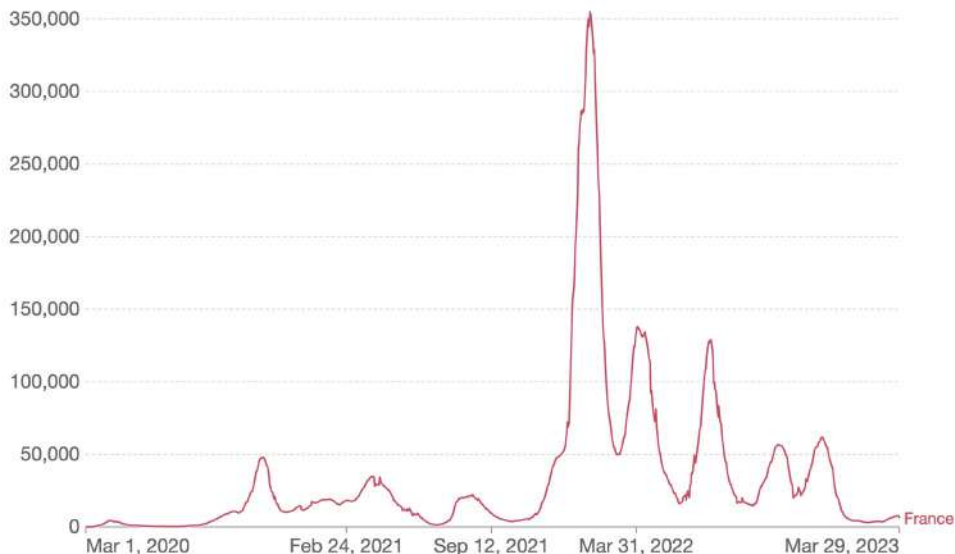
### État des lieux

La pandémie de Covid -19 a joué un rôle de révélateur sur le fonctionnement de la recherche sur des thèmes liés à la santé en France (Figure 6). D'une part, l'émergence d'un nouveau coronavirus a rappelé l'importance de financer des activités de recherche fondamentale sur divers pathogènes, tandis que le succès des vaccins à ANR\* a souligné l'utilité des recherches de long terme et des projets exploratoires. D'autre part, l'épidémie a aussi mis en exergue des difficultés liées à l'organisation de la recherche biomédicale en France, la lourdeur de contraintes réglementaires,

le biais vers le soin aux dépens de la prévention et la considération de la santé comme un sujet propre et réservé aux médecins. Enfin, la pandémie a montré l'importance de sujets propres à CNRS Écologie & Environnement : les interactions hôtes-pathogènes et les sauts d'hôtes, les effets des changements anthropiques sur les émergences de pathogènes, et surtout l'évolution biologique. En plus de souligner l'utilité directe de ces champs de recherches, il y avait là une opportunité de mettre en avant ces thèmes dans la discussion publique, insuffisamment pris en compte.

### Daily new confirmed COVID-19 cases

7-day rolling average. Due to limited testing, the number of confirmed cases is lower than the true number of infections.



Source: WHO COVID-19 Dashboard

CC BY

Figure 6.  
Cas de COVID  
en France  
depuis Mars  
2020.  
© Our world  
in data

### Questions futures

- Quelle est la place du CNRS sur les questions de santé ? Et en particulier sur les questions de santé humaine ? Le thème est présent dans la plupart des instituts du CNRS, ce qui met en avant le caractère interdisciplinaire de son approche. Comment améliorer la visibilité institutionnelle du CNRS sur le sujet ?

#### Verrous à lever :

- Le CNRS n'est pas perçu comme un acteur sur les questions de santé, notamment humaine. Le sujet est vu comme une prérogative de l'Inserm et des CHU.
- Le CNRS n'a pas de rôle de premier plan, ni dans l'ANRS|MIE\*, ni dans PREZODE\*.

- Comment faciliter les recherches en santé, notamment humaine, au CNRS ?

#### Verrous à lever :

Les contraintes réglementaires sont fortes et parfois inhibantes, en particulier en ce qui concerne les recherches impliquant la personne humaine. Il a été proposé de mettre en place au CNRS des soutiens au montage de dossiers, mais aussi d'avoir une attitude plus combative pour faire évoluer la réglementation.

- Quel rôle pour le CNRS en temps de crise sanitaire ?

#### Verrous à lever :

Le CNRS a été comparativement peu sollicité et présent lors de la crise Covid-19, et sa représentation au sein du COVARS\* est minimale.

## Conséquences éco-évolutives des interventions médicales et agronomiques

### État des lieux

La lutte chimique est la stratégie la plus importante et la plus largement utilisée contre la plupart des organismes nuisibles (virus, bactéries, champignons, parasites, insectes vecteurs de maladies, insectes ravageurs des cultures...) dans le monde. En réponse à ces agressions externes, ces organismes évoluent de mécanismes de résistance qui diminuent l'efficacité de ces produits, et qui entraînent leur utilisation

en plus grande quantité avant de les rendre complètement inutilisables.

Cependant, l'efficacité des phytosanitaires est menacée par l'évolution des agents pathogènes, des mauvaises herbes et des insectes nuisibles résistants. La résistance aux insecticides concerne également les vecteurs de certaines des maladies humaines les plus dangereuses (paludisme, dengue, virus de l'encéphalite...).

### Questions futures

- Il y a un besoin urgent de comprendre les pressions de sélection sous lesquelles les mutations de résistance émergent persistent et se propagent dans les populations (Andersson *et al.*, 2020). Quels sont les coûts physiologiques associés aux mutations de résistance ? Quelles sont les interactions épistatiques entre mutations ? Quel est le rôle du transfert horizontal de gènes dans l'évolution des résistances ? La sélection pour la résistance peut-elle simultanément sé-

lectionner des parasites plus virulents ? Peut-on minimiser la force de la sélection naturelle sur les gènes de résistance en modifiant la dose du médicament ou en appliquant des thérapies combinées ? Les pathogènes peuvent-ils évoluer sous forme de résistance contre des vaccins ?

#### Verrou à lever :

Faciliter l'accès aux données de santé, notamment humaines. Mise en place de contrats de

recherche pour des bio-informaticiens pour analyser l'énorme quantité de données générées par les méthodes de génomique et de transcriptomique de dernière génération.

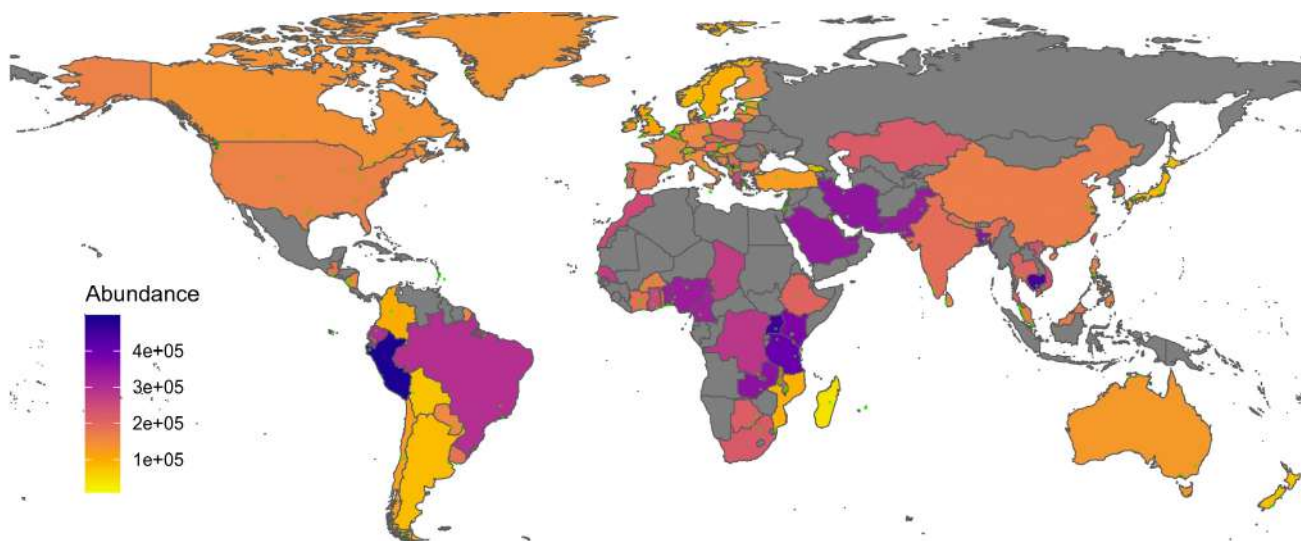
- Les masses d'eau telles que les effluents d'eaux usées, les lacs et les rivières sont des milieux favorables à l'évolution et la propagation de nouvelles résistances (Figure 7). Plusieurs projets pilotes ont déjà été mis en place pour surveiller l'antibiorésistance dans les eaux usées, mais des connaissances restent encore à consolider sur certains points pour bien concevoir ces systèmes (Nguyen *et al.*, 2021). Plusieurs niveaux d'intervention peuvent être envisagés pour tenter de limiter la présence de bactéries résistantes dans les eaux. Il est par exemple possible d'effectuer des traitements pour dégrader les antibiotiques éventuellement présents, réduisant de fait la pression de sélection de résistances. Les interventions les plus efficaces seraient sans doute à mettre en place en amont.

**Verrous à lever :**

- Comment surveiller les antibiotiques dans les eaux : comment les doser (difficultés de mesure), et que doser (beaucoup de métabolites) ? Quel est le lien exact entre la présence d'un antibiotique et l'émergence ou la sélection future de bactéries résistantes ? Les « effets cocktail » (voir « Exposome et Santé ») ne sont pas pris en compte dans les recommandations actuelles à ce sujet.

- La pertinence éventuelle de surveiller la présence de phages (virus qui infectent les bactéries et qui sont préconisés comme alternatives aux antibiotiques) dans les eaux.
- L'estimation du niveau de risque réel en santé humaine associé à la présence d'un gène ou d'un plasmide de résistance dans les eaux ; des approches de quantification de ce risque (EQRS : Évaluation Quantitative de Risques pour la Santé) peuvent être développées. La mise en place de tels systèmes de surveillance nécessite une coordination aux niveaux locaux et nationaux, qui n'est pas toujours évidente (par exemple pour cause de conflits entre plusieurs initiatives issues de tutelles différentes).
- Questions de gouvernance liées à des politiques publiques d'incitation à la réduction de la consommation d'antibiotique : éducation des prescripteurs, incitation au développement (par l'industrie pharmaceutique) et à l'usage d'antibiotiques à spectre étroit (en France, les antibiotiques à large spectre sont surutilisés), éducation des usagers (ex. ne pas jeter avec les déchets « usuels » des antibiotiques inutilisés).

Figure 7. Le résistome global basé sur la surveillance des eaux usées. Pays colorés par la charge totale moyenne de résistance aux antimicrobiens. Les petits points verts indiquent les sites d'échantillonnage uniques contribuant à la charge moyenne de la RAM  
© Patrick Munk *et al.* CC BY 4.0 - Wikimedia Commons



- Compréhension de la pollution par les phytosanitaires et de ses impacts :
  - les interactions, ou « effets cocktails », entre phytosanitaires, ou entre phytosanitaires et autres molécules (par exemple des antibiotiques) ;
  - les conséquences sur la persistance des phytosanitaires des phénomènes liés au changement climatique (réchauffement, pluviométrie...) ;
  - la biodisponibilité des phytosanitaires, afin d'évaluer les risques pour les humains ;
  - les sources de pollution : par exemple, il n'est pas évident quand on constate la présence de certains produits dans les eaux côtières, de savoir s'ils proviennent d'une utilisation agricole ou bien de peintures sur des bateaux (mêmes produits parfois utilisés) (Schneeweiss *et al.*, 2022).

#### **Verrous à lever**

- Il est essentiel de mettre en place des études à long terme : ceci notamment afin de mieux mesurer la durée de persistance des produits phytosanitaires dans les milieux. Connaître cette durée est fondamental afin d'être en mesure d'évaluer l'efficacité de politiques publiques (ex. interdiction d'un produit).
- Il existe actuellement plusieurs limites associées au dispositif actuel de surveillance des phytosanitaires :
  - Les normes actuelles ne sont pas toujours basées sur la science, en l'absence de données toxicologiques de qualité (cas des nombreux métabolites de pesticides dans l'eau de boisson) ;
  - Le nombre de molécules recherchées reste très limité ;

- Il y a un déficit d'information des populations concernées, qui ne sont souvent pas conscientes de leur niveau d'exposition, avec un potentiel de crise sanitaire non négligeable. Le développement de projets de recherches participatives ou de recherche-action, associant directement les populations concernées afin de les impliquer dans le recueil de données d'exposition, pourrait constituer une solution efficace à ce dernier point.

- Développement de sites agricoles expérimentaux pour contrôler la pollution par les produits phytosanitaires, et dans lesquels on pourrait tester différentes interventions :

- développement et mise en place de méthodes de dégradation des polluants qui seraient moins coûteuses que celles actuellement disponibles ;
- utilisation de produits phytosanitaires biodégradables. Ces sites et les cultures qui y sont produites pourraient alors être comparés à d'autres sites « classiques » afin d'évaluer (sur différents temps : court terme/moyen terme/long terme), en conditions réelles, les bénéfices potentiels des interventions proposées.

#### **Verrous à lever :**

De manière générale, contrôler la pollution par les phytosanitaires suppose de tenir compte du continuum environnemental : sol - air - eaux (océans et eaux continentales). Si des appels à projets existent déjà et prennent cet aspect en compte, peu de laboratoires sont assez pluridisciplinaires pour couvrir tous ces aspects.

## **Conclusions**

Aujourd'hui, l'étude de la santé d'un point de vue écologique et évolutif est sans doute l'un des domaines les plus dynamiques de la biologie. Les progrès technologiques en cours, notamment dans le domaine de la génomique, permettent de surmonter rapidement les obstacles liés à la qualité des données et favorisent des avancées rapides dans la compréhension de la dynamique complexe des maladies infectieuses et non infectieuses. En parallèle, des nouvelles approches théoriques soulèvent de

nouvelles questions sur les interactions hôte-parasite-environnement-société.

Grâce à une diversité d'approches et de systèmes modèles, allant de l'homme aux animaux et aux plantes, les chercheurs de CNRS Écologie & Environnement jouent depuis plusieurs années un rôle clé dans le décryptage des processus écologiques et évolutifs à l'origine des maladies infectieuses et non infectieuses. Une part de l'enthousiasme qui entoure cette discipline est son potentiel à prédire et à atténuer l'apparition,



la gravité et l'évolution des maladies chez les humains, la faune sauvage et domestique et les plantes.

Au-delà même de CNRS Écologie & Environnement, le sujet de la santé est largement représenté dans de nombreux instituts du CNRS. Aucun autre organisme de recherche ne peut proposer une telle approche pluri- voire interdisciplinaire, mais aussi intégrative, de la santé. Bien que l'écologie de la santé ait été inscrite au Contrat d'objectifs et de performance 2019 - 2023 du CNRS, la visibilité et la considération même du sujet de la santé sont en effet souvent limitées en France à son volet biomédical, en dehors du CNRS.

Le CNRS doit s'emparer de ce domaine de recherche interdisciplinaire pour lequel il est idéalement placé au travers ses différents instituts CNRS Écologie & Environnement, CNRS Biologie, CNRS Sciences humaines & sociales, CNRS Mathématiques, CNRS Terre & Univers...), et y investir pour l'avenir (moyens humains et matériels, visibilité et représentativité au niveau institutionnel), à l'image de ce qui a été fait dans d'autres pays (ex. les gouvernements des Etats-unis et du Royaume-Uni). Un recensement des laboratoires, expertises et ressources disponibles est un pre-

mier pas essentiel afin de structurer la communauté scientifique française.

Les points sur lesquels CNRS Écologie & Environnement peut apporter des contributions majeures sont, entre autres :

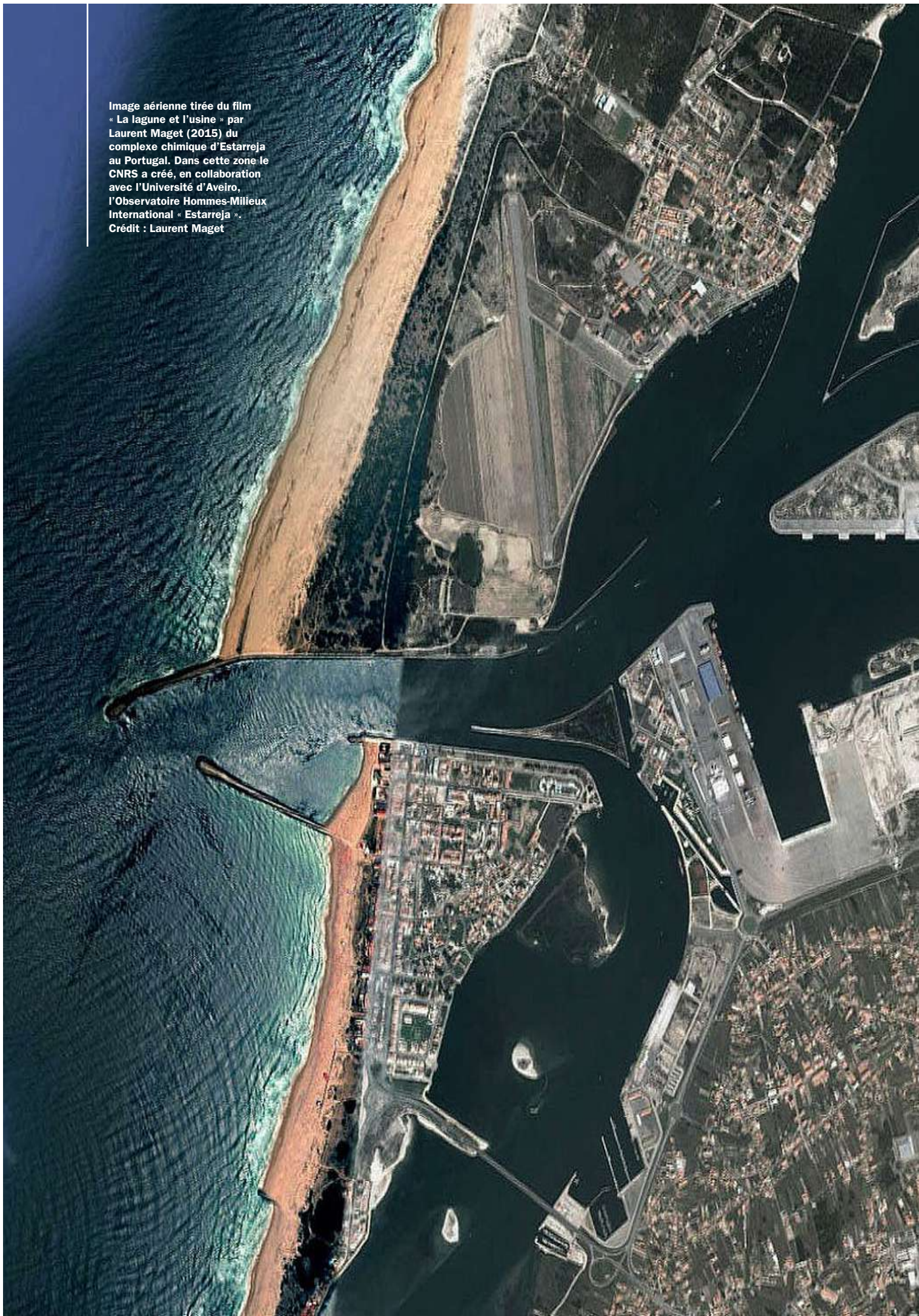
- le développement de méthodes pour le suivi des écosystèmes et des populations animales et humaines *in natura* ;
- la création, la gestion et l'interprétation de grandes bases de données (omiques, suivi long terme, multi-échelles) ;
- la mise en place d'outils d'analyse, de modélisation et de prédiction avec la prise en compte des dynamiques spatio-temporelles et des données multi-échelles ;
- la compréhension des mécanismes génétiques, moléculaires, et physiologiques qui sous-tendent l'évolution des pathogènes (virulence, résistance) et de ses hôtes (immunité, tolérance) ;
- le développement de solutions innovantes de prévention et de réduction des risques sanitaires basées sur la nature et les écosystèmes ;
- le développement de méthodes pour le suivi de l'impact des politiques publiques sur la santé des populations et des écosystèmes.

## RÉFÉRENCES

- Anderson D.I., Balaban N.Q., Baquero F., Courvalin P., Glaser P., Gophna U., Kishoni R., Molin S. & Tønjum T. (2020) Antibiotic resistance: turning evolutionary principles into clinical reality. *FEMS Microbiology Reviews*, doi: 10.1093/femsre/fuaa001
- Brink P, Fontaine M.C., Beukeboom L.W. & Salles J.F. (2019) Hosts, symbionts and the microbiome : the missing tripartite interaction. *Trends in Microbiology*, doi : 10.1016/j.tim.2019.02.002
- Butler C.D. (2018) Planetary epidemiology: towards first principles. *Current Environmental Health reports*, 5, pages 418–429 (2018)
- Charlesworth D., Barton N.H. & Charlesworth B. (2017) The sources of adaptive variation. *Proceedings of the Royal Society of London B*, doi : 10.1098/rspb.2016.2864
- Cunningham A.A., Daszak P & Wood J.L.N. (2017) One Health, emerging infectious diseases and wildlife: two decades of progress? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, doi: 10.1098/rstb.2016.0167
- Glidden C.K., Nova N., Kain M.P., Lagerstrom K.M., Skinner E.B., Mandle L., Sokolow S.H., Plowright R.K., Dirzo R., De Leo G.A. & Mordecai E.A. *Current Biology*, doi: 10.1016/j.cub.2021.08.070
- Johnson P.T.J., de Roode J.C. & Fenton A. (2015) Why infectious disease research needs community ecology. *Science* 349 (6252)
- OMS/WHO (2022) Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report. World Health Organization Report, ISBN: 9789240062702, 82p.
- OMS/WHO (2022) Invisible numbers: the true extent of non-communicable diseases and what to do about them. World Health Organization Report ISBN 9789240057661, 42p.
- Nguyen A.Q., Vu H.P., Nguyen L.N., Want Q., Djordjevic S.P., Donner E., Yin H. & Nghiem L.D. (2021) Monitoring antibiotic resistance genes in wastewater treatment: current strategies and future challenges. *Science of the Total Environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146964
- Niedzwiecki M.M., Douglas I.W., Vermeulen R., Chadeau-Hyam M.C., Jones D.P & Miller G.W. (2019) The exposome : molecules to populations. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, doi : 10.1146/annurev-pharmtox-010818-021315
- Schneeweiss A., Juvigni-Khenafou N.R.D., Osakpolor S., Scharmueller A., Scheu S., Schreiner V.C., Ashauer R., Escher B.I., Leese F. & Schafer R.B. (2022) Three perspectives on the prediction of chemical effects in ecosystems. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.16438
- Steffen W., Broadgate W., Deutsch L., Gaffney O. & Ludwig C. (2015) The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration, *The Anthropocene Review*, doi: 10.1177/205301961456478
- Webster J.P., Gower C.M., Knowles S.C., Molyneux D.H. & Fenton A. (2016) One Health—an ecological and evolutionary framework for tackling Neglected Zoonotic Diseases. *Evolutionary Applications*, 9, 313-333.



Image aérienne tirée du film  
« La lagune et l'usine » par  
Laurent Maget (2015) du  
complexe chimique d'Estarreja  
au Portugal. Dans cette zone le  
CNRS a créé, en collaboration  
avec l'Université d'Aveiro,  
l'Observatoire Hommes-Milieux  
International « Estarreja ».  
Crédit : Laurent Maget





Les  
écosystèmes  
**en crise**

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &**  
**Environnement**  
2023

# Socio- écosystèmes en crise :

## le milieu urbain, le littoral

Auteurs : Jean Nabucet (LETG), Vanina Pasqualini (SPE), Anne Puissant (LETG), Brice Trouillet (LIVE),  
Béatrice Béchet (IRSTV), Nathalie Niquil (BOREA)

### 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Pratiquer de manière réflexive la recherche en société
- ▶ Décloisonner la recherche pour mieux saisir les continuums et les chaînes de causalité dans le temps et l'espace
- ▶ Favoriser les interactions entre les réseaux et l'accès aux données pour des réponses globales aux écosystèmes en crise

## Introduction

Dans un contexte de changement global, les socio-écosystèmes sont soumis à des pressions biophysiques et anthropiques générant des situations de crises et/ou transitions à plus ou moins long terme et à différentes échelles spatiales.

Il s'agissait dans cet atelier de s'intéresser plus particulièrement à deux biomes spécifiques et fortement anthropisés que sont la ville et le littoral. Chacun est impacté non seulement par les changements globaux, les variations climatiques avec la multiplication d'événements extrêmes et autres événements majeurs, l'urbanisation, les pressions sur les ressources, mais aussi par des dynamiques internes (espèces, sociétés) qu'il s'agit de mieux comprendre.

Si ces biomes peuvent s'appréhender dans leur fonctionnement propre, ils doivent aussi être considérés à travers leurs interfaces (terre-mer, urbain-périurbain-campagne/rural) pour une gestion intégrée et durable des territoires et des socio-écosystèmes.

Pour cet atelier, les participants étaient invités à ancrer leurs réflexions prospectives dans l'un des deux axes suivants :

- Dans un contexte de changements globaux, les « dynamiques » des socio-écosystèmes renvoient-elles à des phénomènes de « crise(s) » ou de « transition(s) », ou à de simples fluctuations ? Alors que la crise qualifie une situation de tension voire de rupture affectant un socio-écosystème (Holling *et al.*, 2002 ; Beck *et al.*, 2006), généralement connotée négativement, la transition évoque davantage le passage progressif (mais non forcément linéaire) d'un état à un autre plutôt considéré comme meilleur. Mais ces notions de crise ou de transition, qui sont aussi des construits sociaux, ne sont sans doute pas suffisamment stabilisées. Il convenait donc de réinterroger ces notions à travers ces deux biomes – ville et littoral – où les pressions multi-sources et multi-échelles s'expriment sur des espaces limités.

- Par leur ampleur, par leur rapidité, par les décalages dans le temps et dans l'espace entre les causes et leurs manifestations, par la complexité des combinatoires..., les changements globaux conduisent également à revisiter la question de la capacité des sociétés humaines à agir. Il s'agissait donc de s'intéresser aux trajectoires spatio-temporelles à travers la régulation, l'adaptation, la gestion, l'anticipation, la remédiation, la mitigation..., là encore en prenant appui sur les deux biomes, la ville et le littoral, offrant une diversité de cas d'étude.

Transversalement à ces deux axes de discussion, pouvaient être mis en perspective :

- les dispositifs d'observation ;
- les échelles (du mondial au local, du long au court terme) ;
- la place du numérique, de l'observation à la régulation en passant par la formulation du « problème » ;
- les savoirs dans toute leur diversité (« scientifiques » ou non) ;
- la place de l'humain, autrement dit la question de l'anthropisation ou de l'humanisation et celle des usages ;
- la question de la réflexivité.

Ainsi introduit, cet atelier a été nourri en amont par quinze contributions. 75 participants se sont mobilisés pour cet atelier, couvrant un large spectre de 20 disciplines et de 35 laboratoires. Un format « *world café* » leur a alors été proposé, c'est-à-dire de courtes séquences de discussions aléatoires par sous-groupes autour de quatre entrées : l'état des lieux, les questions futures, les verrous et les moyens.



## État des lieux

Lors de cette séquence, les participants étaient invités à produire collectivement un état des lieux sur les « socio-écosystèmes en crise », considérés ici par les milieux urbains et littoraux. À partir des riches discussions, la synthèse peut être structurée autour de quatre axes : la définition de la crise elle-même, la connaissance de la crise, la société de crise et la perception de la crise (par la recherche).

### La crise : quelles définitions ? Quels mots-clés ?

Des échanges, il ressort que la crise naît d'un « événement majeur », extrême, de très forte intensité. Il apparaîtrait donc clairement un « avant » et un « après », sans transition, d'où l'idée d'un basculement, d'une rupture ou d'une phase aiguë dans l'évolution d'un socio-écosystème, dont l'issue semble indéterminée (ex. submersion marine, crise sanitaire).

Aussi, la question de la temporalité est apparue centrale voire prégnante. Il serait à la fois question de la rapidité des changements, au regard des réponses apportées à des vitesses variées mais généralement plus lentes ou avec un temps de retard, faisant ainsi apparaître des décalages.

L'accélération des changements rend ces décalages encore plus patents, d'où l'idée d'une urgence politique (*i.e.*, agir maintenant, tout de suite) et, face à une certaine absence de réaction, se développe un sentiment d'anxiété, à la fois dans la communauté scientifique mais aussi sur un plan général.

Pour poursuivre sur cette idée, l'accélération est telle qu'elle interrogerait désormais la capacité même de la recherche à produire les connaissances nécessaires au développement de formes d'adaptation. C'est donc plus globalement le fonctionnement de la science qui est questionné, notamment dans sa relation au « politique ».

### La connaissance de la crise

Comme autant de signaux faibles, la recherche produit des connaissances sur la crise (celle qui s'est produite, celle qui se manifeste, celle qui adviendra), ses effets ou manifestations, accentuant le décalage avec la faiblesse de la réaction politique. En particulier, même s'ils doivent encore être approfondis, des efforts importants ont été réalisés en termes de spatialisation des impacts (ex. sur le bâti ou en matière de submersion marine), à différentes échelles, mettant ainsi en évidence la question des seuils ou encore des limites (ex. consommation de ressources), avec une nécessité de toujours plus de précision dans leur définition. Dans d'autres champs de la connaissance, des progrès ont été accomplis permettant de mieux comprendre les réactions de la « société », autour par exemple des notions de résilience (issue de la psychologie sociale) ou encore d'adaptation (constat ex-post et observation des adaptations). Aussi, la prise en compte de temps long a permis de mieux apprécier des séries de trajectoires séparées par des moments particuliers (crises), et donc de mieux identifier le besoin de gestion (ex. plan de prévention des risques) et le type de choix à

faire (ex. partage des ressources, stratégies de délocalisation).

Un point d'achoppement demeure : le fait de pouvoir conduire une analyse véritablement intégrée du socio-écosystème, qui permettrait de mieux appréhender sa complexité et sa dynamique. Cela est apparu d'autant plus nécessaire que, bien souvent, des situations de surimposition ou d'emboîtement de crises ont été décrites. De même, les enjeux d'anticipation et d'expérimentation du changement (ex. *living labs*) ont été pointés. En ce domaine, il semble que les retours d'expérience devraient pouvoir être mieux formalisés et documentés afin d'être davantage pris en compte en matière de gouvernance, interrogeant parfois la question de l'accessibilité aux données.

Les Zones Ateliers (ex. ZA Brest Iroise) et les Observatoires Hommes-Milieux (ex. OHM Littoral Méditerranéen) constituent en ce sens des infrastructures interdisciplinaires adaptées à l'étude des socio-écosystèmes pour appréhender la complexité et documenter la dynamique des milieux que sont les littoraux et les villes, en lien avec les enjeux de société.

### La « société de crise »

Si la crise des écosystèmes a souvent constitué la base de toute discussion dans chacun des sous-groupes, en creux est presque systématiquement apparue la question de la crise de société, et plus encore de la « société de crise ». Face aux multiples crises survenues, les questions liées aux « risques existentiels », aux représentations de la crise, à la culture de la crise, à la mémoire de la crise (et inversement à l'absence ou la perte de mémoire) ont en effet été mobilisées en arrière-plan. Dans ce registre, il a souvent été question du besoin de reconnexion de la société à son environnement. Aussi, les discussions ont porté sur la caractérisation de la crise d'un point de vue social ou sociétal, renvoyant à l'interrogation relative à « la crise pour qui ? ». Il a été souligné que cette interrogation renvoyait, sans que cela ne soit spécifique aux littoraux ou aux villes, aux questions de justice socio-environnementale et territoriale, aussi à la question de la relativité des vécus, en fonction des individus et des « contextes ». Les enjeux à la fois politiques et financiers ont affleuré lorsqu'il s'est agi des territoires les plus exposés, aussi bien du point de vue de l'aléa (ex. zones deltaïques et côtières), que du point de vue de la vulnérabilité (ex. populations défavorisées ou pauvres).

### La perception de la crise (par la recherche)

Très majoritairement, la crise a été envisagée par les participants comme un objet anxiogène. La raison est principalement liée à la quasi-absence d'attention portée au niveau politique et sociétal, et donc dans la définition des priorités de recherche (financements) ; ainsi la crise est essentiellement analysée après coup, *ex post*, et rarement avant qu'elle ne survienne. La recherche, elle-même considérée comme en crise (« un pansement sur une jambe de bois ») a été souvent présentée comme un élément contribuant à l'atmosphère anxiogène, dans la mesure où l'injonction de répondre rapidement aux questions posées se heurte aux moyens mis à disposition. Il est dès lors important de rappeler que le scientifique est attendu sur au moins deux fonctions distinctes : la recherche qui implique parfois des temps longs (voire très long) et l'expertise, qui peut être rapide, mais

qui nécessite de prendre des précautions pour être pertinente dans sa réponse, et implique un recours indispensable à l'interdisciplinarité. Pour partie, il a été précisé que des moyens d'actions existaient, notamment des structures de transfert ou de médiation scientifique, aidant à faire passer des messages aussi bien auprès des élus que des populations plus largement.

Comme corollaire, le souhait a souvent été exprimé de se tourner vers une approche connotée plus positivement (ex. « sortir de la crise »). Ainsi, quelques voix ont cherché à présenter la crise comme une opportunité. En la matière, les participants ont constaté un (début de) changement de comportement des élus face aux crises, vers une plus grande reconnaissance de la crise.

## Les questions futures

Les nombreuses discussions menées lors de l'atelier ont fait émerger quatre types de questionnement à soutenir, renforcer et/ou à développer : les réflexions sur la complexité de ces environnements, la nécessité d'une approche intégrée dépassant les frontières de l'institut, le caractère indispensable des réseaux d'observation et le questionnement sur la place du chercheur.

### Des milieux complexes

Au cours des échanges, les participants ont souligné la difficulté de qualifier la notion de crise (cf. état de l'art). Celle-ci revêt, en fonction des disciplines, une grande diversité de formes et d'états qui ne sont pas partagés par tous. Toutes les disciplines ne parlent pas de la même chose

pour évoquer la notion de « crise ». Dès lors, il est apparu important pour le collectif d'insister sur les manques de maturité de certains concepts faisant appel aux systèmes complexes et à la nécessité d'aborder ces questions de manière interdisciplinaire et intégrée. Les discussions ont ainsi souligné la grande diversité des enjeux environnementaux, économiques et sociétaux étroitement liés entre eux sur ces deux milieux, avec comme question de fond la complexité des dynamiques des systèmes qui sont multiples et mul-

tifactorielles. Cela a animé un débat nourri sur l'importance de questionner le passé pour mieux envisager l'avenir, en interrogeant plus particulièrement les notions d'incertitude et d'imprécision des données et des modèles pour accompagner l'adaptation des territoires. En filigrane, un point important a été soulevé quant à la façon d'intégrer cette incertitude dans la prise de décision. Il sera aussi nécessaire d'initier une réflexion avec les juristes de l'environnement pour interroger la prise en compte de l'incertitude en droit.

### **Le développement d'une approche intégrée**

Les notions d'interfaces et de continuum sont des questions centrales dans l'approche des milieux urbains et littoraux. Bien que ces aspects soient déjà présents dans les projets scientifiques de CNRS Écologie & Environnement et de CNRS Terre & Univers, les échanges ont souligné la relative faiblesse de la communauté scientifique dans ces domaines et ont incité fortement à envisager les interfaces/continuum comme des objets à part entière.

Ce constat partagé par les contributeurs a mis en avant l'importance de co-construire la recherche avec les aménageurs des territoires, mais également avec les acteurs de la société civile. Le développement d'une approche intégrée, interdisciplinaire et interinstitutionnelle, afin de développer et

de renforcer cette co-construction des savoirs, a été discutée. Les contributeurs ont souligné à plusieurs reprises l'importance de renforcer l'ancrage des observatoires sur les territoires pour en faire de véritables laboratoires d'expérimentation. Ce lien au territoire par l'observation a été présenté comme central, en rappelant que les observatoires (Zones Ateliers, Observatoires Hommes-Milieux, services nationaux d'observation...) permettaient de développer des approches intégrant le temps long dans la compréhension de certains processus d'interaction entre l'humain et son environnement. Cette notion de temps (passé, présent et futur) a été questionnée et mise en avant comme un aspect important des travaux à mener au travers des notions de flux, de vitesse et de transfert.

### **Les réseaux d'observation pour demain**

Les observatoires et les réseaux d'observation sont apparus comme des outils indispensables pour les contributeurs. Ces outils ont été discutés dans leur fonctionnement actuel et, s'il a été noté que ces dispositifs de recherche permettent déjà un certain nombre de suivis, il a également été évoqué qu'il serait intéressant de les faire évoluer. En effet, ces dispositifs nécessitent d'être renforcés pour permettre un suivi d'évènements soudains ou extrêmes, ce qui faciliterait la compréhension de certains phénomènes. Ces évolutions doivent permettre une plus grande réactivité dans la production de connaissances et une harmonisation des pratiques et des savoir-faire. Des interactions avec l'IR\* Data Terra, ses pôles de données et de services ont été évoqués, tout en précisant qu'ils

ne devaient pas se limiter au simple échange de données. L'évolution des réseaux de mesures doit être pensée à la fois en intégrant la finalité de celle-ci, et en fonction du type de modèle susceptible d'être mobilisé. Les modélisateurs présents ont insisté sur la rétroaction du couple capteurs/modèles qui se fait encore trop peu aujourd'hui, ils ont également souligné les enjeux autour de la modélisation prospective et des scénarios, permettant d'encadrer l'incertitude dans l'action publique. Les discussions ont également porté sur la question des observatoires comme objets d'expérimentations ; échanges lors desquels certains collègues ont souligné l'apport que pourrait avoir ce type de pratique pour accompagner les mutations rapides de la société à l'échelle d'un territoire.

## La place des scientifiques

Un débat, riche et animé, a questionné le rôle clé des scientifiques à l'interface science et société. Les récents événements qui ont profondément marqué notre société ces deux dernières années interrogent la place du chercheur. La communauté est partagée sur ce point, entre ceux qui revendiquent une place du chercheur comme observateurs (passifs) des mutations et ceux qui insistent sur une vision du chercheur comme expérimentateurs (actifs), à l'échelle d'un territoire. Cela questionne l'implication du chercheur dans l'action, au-delà de la question de l'exper-

tise scientifique, pour accompagner la transition et l'adaptation de notre société aux changements en cours. Les mouvements de remise en question de développement de la science ont été évoqués tels que la « *slow science* » ou le « scientifique en rébellion ». Au travers des enjeux très fort présents sur ces deux milieux, il s'agissait ici de questionner la neutralité du chercheur dans l'éthique fondamentale qui est la sienne et d'interpeller la communauté scientifique dans son ensemble sur la responsabilité qui lui incombe.

## Les verrous

Au travers de ces riches échanges, de nombreux verrous ont pu être évoqués et rassemblés en trois groupes distincts.

### Des verrous disciplinaires

Les travaux présentés lors de l'atelier sur ces deux environnements ont souligné la qualité des équipes scientifiques travaillant dans ce domaine. Néanmoins, les échanges ont porté sur la difficulté d'aborder les notions de continuum et d'interface en tant que telles. Beaucoup de travaux opposent encore les domaines terre/mer ou ville/campagne sans questionner ces objets pour eux-mêmes. Malgré des avancées récentes dans le cadre des travaux scientifiques menés sur ces deux environnements, il reste de réels enjeux à faire évoluer sur les pratiques pour développer des approches intégrées.

Les notions de vitesse, de flux, de transferts évoqués au travers de l'observation et des modèles ont mis en évidence la méconnaissance entre deux communautés : les modélisateurs et les personnes qui développent l'observation. Cela est particulièrement vrai dans le contexte actuel où cette période de transition et d'adaptation nécessite de plus en plus d'appel aux modèles et aux

couplages de modèles. Il a été convenu qu'il fallait produire l'élément favorable à un partage de cultures autour du modèle et de l'observation.

Une demande très forte d'interaction avec les unités de sciences sociales de l'environnement a été formulée par les contributeurs majoritairement issus des sciences biologiques ou physiques de l'environnement. Au-delà des études anthropologiques, sociologiques ou comportementales, évoquées lors de l'atelier, les questions d'interaction avec les acteurs de la société, et plus particulièrement des environnements favorisant la co-construction des savoirs, ont été soulevées. La quasi absence de dispositif propice à cela sur le plan institutionnel a posé la question de la relation du chercheur avec des organismes tels que les tiers lieux ou les *living lab*. Il est important de porter à connaissance de la communauté scientifique les retours sur ce type de projets et de développer ce genre d'initiative, afin de construire une culture commune entre les chercheurs et les acteurs.

### Des verrous techniques

Le développement sans précédent d'un flux de données extraordinaire par son abondance ou sa diversité bouleverse les habitudes et

les approches méthodologiques de presque toutes les disciplines. Aujourd'hui, le constat est qu'il est difficile de connaître l'ensemble

des sources de données et encore trop souvent difficile d'y accéder.

La grande complexité des environnements étudiés nécessite de développer des approches intégrées mais dont la complexité est de plus en plus difficile à appréhender. Ces travaux intègrent des approches multi-échelle et multi-temporelle du continuum et posent la question de la manière de simplifier les approches ou les modèles pour généraliser les méthodes.

Les observatoires sont des instruments indispensables qu'il faut soutenir de manière pérenne et renforcer pour les rendre davantage opérationnels en condition d'événements soudains ou extrêmes. Les dispositifs d'observation et les réseaux de capteurs ont été largement abordés au travers des développements sur les capteurs à haute fréquence, les capteurs bas coût (Terra Forma) ou encore l'exploitation des méthodes dérivées de l'intelligence artificielle.

### **Des verrous structurels**

L'accroissement des vitesses des changements globaux bouleverse les temporalités établies. Le temps de la recherche et le temps de l'action publique sont de moins en moins en phase et de nombreux questionnements sont soulevés autour de l'évaluation du chercheur, de la complexité du paysage institutionnel français de la recherche. Tous sont unanimes pour insister sur le fait que l'expertise scientifique doit accompagner l'action et le discours public dans une temporalité adéquate, sans pour autant nuire à la qualité scientifique des travaux menés. Cependant l'administratif grandissant dans l'activité du chercheur, cela ne permet pas cet accompagnement. Il se pose de plus en plus souvent, dans les dispositifs de recherche, des problématiques de portage d'actions collectives, particulièrement chez les jeunes chercheurs dont la reconnaissance ne naît qu'au travers du portage de projets de grande ambition (ANR, ERC). Le fonctionnement des structures de recherche,

historiquement en silo, ne facilite pas les échanges inter-instituts. Si les questions de recherche doivent aujourd'hui évoluer et aller vers de plus en plus d'approches interdisciplinaires ou transdisciplinaires, il apparaît qu'une simplification de l'architecture des dispositifs de recherche doit l'accompagner en ce sens.

L'évaluation du chercheur, essentiellement basée sur des bilans bibliométriques, et finalement assez peu sur son apport à la société, inquiète également les contributeurs qui rappellent cependant le caractère indispensable de se confronter à ses pairs dans l'évaluation de la qualité scientifique des travaux. La responsabilité du chercheur dans la diffusion de la connaissance auprès de la société civile ou de son expertise auprès des décideurs (aide à la décision, appui de la science aux politiques publiques, réponse à une question sociétale concrète posée par le politique...) est finalement très peu prise en compte dans son évaluation.

## **Les moyens**

Au cours de cette séquence, les participants ont réfléchi collectivement aux moyens à mettre en œuvre pour répondre à la problématique du milieu urbain et du littoral en crise. La synthèse est présentée autour de cinq axes : le suivi de la crise, des données jusqu'aux modèles, les liens entre acteurs et territoires (science-action), la structuration de la recherche et les moyens financiers et humains.

### **Le suivi de crise : avant, pendant, après**

Les discussions ont porté majoritairement sur la nécessité de développer et de renforcer les réseaux de mesure. Ces réseaux doivent être adaptés aux suivis des crises sur des temps

longs, mais également sur des temps courts, afin d'avoir la réactivité nécessaire face à des événements extrêmes, tels que des crues, des tempêtes, des submersions en milieu littoral

ou des vagues de chaleur en milieu urbain. Si le rôle majeur des Observatoires Hommes-Milieux (OHM), des Zones Ateliers (ZA), ainsi que de dispositif de CNRS Terre & Univers tel que les Services Nationaux d'Observation (SNO) ou des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU)

est rappelé comme central dans le suivi de crise des socio-écosystèmes, il conviendrait de les renforcer et surtout de les décloisonner pour améliorer les interactions. Ces outils vont d'ailleurs bien au-delà des socio-écosystèmes littoraux et urbains.

### **Des données aux modèles : observer, anticiper, prévoir**

Face à des milieux complexes et très dynamiques que sont le milieu urbain et le littoral, les participants à l'atelier ont souligné le besoin de développer l'accès et la gestion des données (grande diversité de données liée à l'interdisciplinarité), afin d'améliorer la compréhension de ces milieux. Des données à haute résolution spatiale et temporelle sont nécessaires pour

observer des processus spécifiques, comme l'érosion côtière en zone littorale ou encore les inondations en milieu urbain. Les outils de modélisation sont précieux pour anticiper ou prévoir les crises et ils doivent être déployés. Il sera nécessaire de soutenir et de développer ces outils de modélisation et de prospectives à l'interface des disciplines.

### **Liens avec acteurs et territoires : science-action**

Les participants ont abordé l'importance de la relation avec les acteurs (publics, privés...), sur un territoire donné (ancrage territorial), pour anticiper les crises, et notamment les événements extrêmes. Même si les temporalités sont différentes entre la recherche et celle des décideurs, il a souvent été question d'améliorer le lien entre

recherche et appui à la décision. L'objectif de se tourner vers une co-construction des approches avec les acteurs a été énoncé. En lien avec la difficulté exprimée d'échanger et de dialoguer avec un certain nombre d'acteurs, une aide à la médiation pourrait jouer un rôle majeur dans le domaine de la gestion des crises.

### **Repenser la structuration de la recherche**

Si les avantages des dispositifs tels que les observatoires (OHM, OSU), les Zones Ateliers ou les Services Nationaux d'Observation ont été soulignés par les participants, ceux-ci préconisent également de les renforcer et de les compléter avec des outils souples et légers qui puissent répondre rapidement à des questions précises sur des objets déterminés et interdisciplinaires.

Les discussions font aussi état de la nécessité de mettre en œuvre une animation nationale, assurée par une coordination inter-instituts (CNRS Sciences humaines & sociales, CNRS Écologie & Environnement, CNRS Terre & Univers, CNRS Ingénierie) ou avec d'autres organismes de recherche tels que l'Ifremer ou l'IRD, sur les littoraux comme sur les villes, basée sur les dispositifs existants.

### **Les moyens financiers et humains**

La question des moyens financiers et humains a été largement débattue. Les participants préconisent de pérenniser et d'augmenter les moyens, notamment sur l'acquisition et la sécurisation des données, comme par exemple sur l'instrumentation ou le déploiement des principes FAIR\*. Les besoins en ingénieurs et techniciens

restent cruciaux, indispensables et stratégiques au développement de l'observation et de l'expérimentation. Les discussions ont également fait ressortir la nécessité d'impliquer davantage les jeunes collègues doctorants et contractuels dans les réflexions sur les moyens, afin de dynamiser les processus.



## RÉFÉRENCES

- Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N., et al. (2019). Sustainability and resilience for transformation in the urban century. *Nature Sustainability*, 2, 267-273. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0250-1>
- Grove, J. M., Pickett, S. T. A. (2021). Evolution of Social-Ecological Research in the LTER Network and the Baltimore Ecosystem Study. In R. B. Waide & S. E. Kingsland (Eds.), *The Challenges of Long Term Ecological Research: A Historical Analysis* (Archimedes, vol. 59). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66933-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66933-1_10)
- Heymans, A., Bredsdell, J., Morrison, G. M., Byrne, J. J., Eon, C. (2019). Ecological urban planning and design: A systematic literature review. *Sustainability*, 11(15), 4235.
- Hoelscher, K., Geirbo, H. C., Harboe, L., Petersen, S. A. (2022). What Can We Learn from Urban Crisis? *Sustainability*, 14(2), 898. <https://doi.org/10.3390/su14020898>
- Latour, B. (2007). *Petites leçons de sociologie des sciences*. La découverte.
- Latour, B. (2004). *Politiques de la nature: Comment faire entrer les sciences en démocratie*. La découverte.
- Monfort, P., Robert, S., & Pardo, C. (2021). «French Mediterranean coastal zone» Human-Environment Observatory (OHM).
- Ratter, B., & Leyshon, C. (n.d.). *Perceptions of and Resilience to Coastal Climate Risks*. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Retrieved June 15, 2023, from <https://oxfordre.com/climate-science/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-819>.
- Rocle, N. (2017). *L'adaptation des littoraux au changement climatique: Une gouvernance performative par expérimentations et stratégies d'action publique* (PhD thesis).



# Rétroaction du fonctionnement des écosystèmes à l'échelle régionale vers le fonctionnement global

Auteurs : Samuel Abiven (LG ENS), Joël Guiot (CEREGE), Thomas Servais (Evo-Eco-Paléo)

Contributeurs : Sébastien Barot (IEEE-P), Yves Brunet (ISPA), Pierre Faure-Cattelain (LIEC), Josette Garnier (METIS), Gerald Gregori (MIO), Fabrice Not (AD2M), Bert Van Bocxlaer (Evo-Eco-Paléo)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Favoriser la co-construction entre modélisateurs, expérimentateurs et utilisateurs pour être utile à la compréhension des données et des modèles pour produire une aide réelle à la décision impliquant d'évaluer incertitude, stabilité et complexité des processus
- ▶ Mettre les moyens pour la collecte de données sur le long terme (observatoires) avec des ressources dédiées permettant une pérennité de la collecte d'information
- ▶ Favoriser de nouvelles approches comme l'intelligence artificielle, l'assimilation des données et la capacité à prendre en compte l'hétérogénéité spatiale et disciplinaire

## Introduction

Les rétroactions dans nos écosystèmes sont nombreuses et complexes. La compréhension de la structure et du fonctionnement des écosystèmes est au cœur des enjeux actuels, notamment dans le cadre de l'intensité des changements environnementaux et de leur accélération (climat, biodiversité, pollution, exploitation des ressources naturelles). Elle nécessite le développement d'approches intégrées (écologie globale), permettant d'accéder aux interactions et couplages complexes entre les différents compartiments et leurs interfaces. L'interaction des échelles, physico-chimique et biologique (de la molécule à l'écosystème), temporelle (de l'ancien - période historique - à l'actuel et à la simulation de scénarios futurs) et spatiale (du processus au global), dans leurs singularités et leur universalité, requiert des itérations continues entre mesures *in situ*, *ex situ* et modélisation, afin d'accéder aux impacts des changements dans toutes les dynamiques des écosystèmes. Cela ne va pas sans poser des questions scientifiques fondamentales sur les concepts de

méta-(socio)-écosystèmes, l'emboîtement des échelles, les effets de seuil ou de rupture, les transitions, ou encore les trajectoires évolutives (adaptation, résilience, durabilité).

Le maître mot de cette thématique émergente est la transversalité : transversalité entre les disciplines, entre les échelles de temps et d'espace, entre l'expérimentation, l'observation et la modélisation, entre les communautés qu'elles soient académiques ou parties prenantes. Cela pose de nombreux problèmes, dont le manque de langage commun qui permet de co-construire à la fois les questions scientifiques et les approches pour y répondre. Nous avons adopté une approche progressive en discutant d'abord sur la façon d'améliorer notre connaissance des mécanismes opérant à différentes échelles dans les écosystèmes, puis en discutant séparément les enjeux de l'acquisition des données et ceux de la modélisation numérique, et enfin en intégrant les deux approches dans le cadre d'une étude approfondie des interactions entre compartiments avec un focus sur les différences d'échelle.

## État des lieux

### Les mécanismes du fonctionnement des écosystèmes

Les processus à fines échelles temporelle et spatiale, au niveau par exemple de la molécule, de la particule, du gène ou de l'individu, sont accessibles par des études expérimentales bien ciblées, principalement en conditions contrôlées. À grande échelle, on peut étudier les paléo-écosystèmes et les interactions et rétroactions à l'échelle globale, mais aussi à une échelle temporelle allant du million au milliard d'années, avec notamment de la rétroaction entre géosphère et biosphère. Mais, quand la dimension spatiale et temporelle s'accroît, on est face à des systèmes de plus en plus complexes avec des mécanismes de rétroaction qui font que ces systèmes ne peuvent plus être réduits à une somme de sous-systèmes simples. Ils nécessitent des approches systémiques intégrées, permettant d'accéder aux interactions et

couplages complexes entre les différents compartiments (sphères) et leurs interfaces (sols, écotones, sociétés) (Abiven *et al.*, 2017). Dans ces systèmes complexes, des effets de type « papillon » ou non linéaires peuvent apparaître, aboutissant à des ruptures, des bifurcations, des effets de seuil. Cela rend plus compliquée l'appréhension de l'adaptation et de la résilience du système. Une simplification extrême de ces systèmes peut conduire à des « maladaptations » et finalement les décisions qui en découlent peuvent nuire à leur résilience.

L'enjeu principal qui se dégage est comment appréhender cette complexité systémique. Les données seules, collectées lors d'expérimentations ou par observation *in natura* permettent souvent de bien connaître les différents compartiments du système, mais les interactions nécessitent

une approche conjuguée entre modèles – souvent non linéaires – et données. Si les modèles ont tendance à simplifier notre approche des systèmes, les données quant à elles, si elles sont collectées sur la base d'une question scientifique bien posée, contiennent le monde réel dans sa complexité, mais il faut savoir les déchiffrer. Toutefois, au-delà de la complexité systémique,

les avancées technologiques permettent d'acquérir des données beaucoup plus rapidement, et à des échelles spatiales multiples, que par un passé encore récent ; les performances du calcul numérique permettent de formuler des hypothèses plus précises, à des échelles plus larges, en intégrant des compartiments qui ne pouvaient pas être intégrés auparavant.

## Les données

Les données sont centrales pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes, leur complexité, les diverses interactions et rétroactions qui les gouvernent. Il s'agit de données d'observation, de terrain et d'expérimentation allant de la molécule au biome, de données discontinues à la haute fréquence. En amont, nous avons besoin de données des forçages (climat, usage des sols, pollution, biodiversité, cycles biogéochimiques) et en aval des mesures sur les impacts des changements de ces forçages sur les écosystèmes. Ces mesures sont nécessaires à la fois pour paramétrer nos modèles, les calibrer et les valider, et donc pour les rapprocher du monde réel.

L'observation sur le long terme est indispensable pour comprendre et suivre la dynamique des systèmes. Cela est souvent incompatible avec les modalités de financement de la recherche sur projets de trois à cinq ans. S'il y a une croissance exponentielle de données sur les systèmes biophysiques grâce à l'arrivée incessante de nouveaux capteurs, cela pose quelques problèmes au niveau de leur utilisation. Les capacités humaines à les interpréter dans le cadre de questions scientifiques sont limitées, et cela est porteur d'un risque d'approche de type « boîte noire » qui est incapable de faire appréhender les mécanismes et donc, qui n'utilise les données que superficiellement et très partiellement. D'autre part, les types de données sont déséquilibrés : nous avons à la fois de grosses masses (*big data*) de données physiques (satellites) et écologiques (stations de suivi, analyses génétiques), et de petits jeux de données qualitatives, comme des résultats d'interviews ou de sondages, issues des études des socio-systèmes. Bien que

beaucoup de données obtenues et disponibles n'ont tout simplement pas été analysées, la course se poursuit vers de plus en plus de données continues.

Il existe un enjeu fort sur les infrastructures de stockage des données, bases de données de type BBES (UAR Bases de données Biodiversité, Écologie, Environnement et Sociétés), capables de traiter les hétérogénéités entre types de données (physiques et humaines, continues et ponctuelles) (Powers & Hampton, 2019). La disponibilité de ces données doit être assurée selon les principes FAIR\* du CNRS, évitant que de nombreux jeux de données se perdent rapidement pour la communauté, ou qu'ils ne soient plus accessibles au plus grand nombre. Cela implique également que les utilisateurs potentiels de ces infrastructures soient formés, que l'expertise se conserve lors des départs des personnels et qu'il y ait une communication active sur l'existence de ces données. Il faut également éviter que ces infrastructures soient réduites à une simple prestation de service. Adossée à la recherche, dans un esprit véritablement interdisciplinaire, elles pourront vivre et susciter de nouvelles questions scientifiques et de nouvelles connaissances. Ce point est particulièrement important pour l'analyse des interactions et rétroactions entre compartiments. Pour éviter d'être submergé par l'abondance de données, il est intéressant de recourir à l'intelligence artificielle qui, en fonction d'un problème donné, pourrait trier les données pertinentes pour répondre à des questions scientifiques ciblées. Cet aspect a été évoqué à de nombreuses reprises, mais il semble que les compétences scientifiques et techniques soient encore manquantes.

## La modélisation numérique

Tout comme les données sont nécessaires pour identifier les rétroactions, les modèles le sont pour comprendre les données, pour tester des hypothèses issues de ces données et les généraliser sous forme de théories. Il existe actuellement une grande palette de modèles, que ce soit du niveau conceptuel à celui des développements mathématiques sous-jacents. Le type d'approches peut être mécaniste, probabiliste - en particulier bayésien - ou simplement conceptuel. Le couplage des modèles, la plupart du temps non-linéaire, opérant sur différents compartiments de l'écosystème, est également un sujet majeur de recherche (par exemple couplage de modèle climatique et modèle d'écosystème).

Il n'y a dans un modèle que ce qu'on y formalise ; la plupart des modèles sont sans doute faux ou au moins incomplets, mais jusqu'à quel niveau font-ils avancer notre connaissance ? Un modèle n'est pas une image de la vérité, mais une construction pour tester des hypothèses. Il répond souvent à une demande des données simulées, mais le modélisateur a aussi besoin de données réelles. Pour être utile, il doit être co-construit entre le développeur et l'utilisateur. Les données d'expérimentation sont souvent acquises sur la base d'un modèle conceptuel qui permet de formaliser les hypothèses de travail. C'est une grande valeur ajoutée pour la modélisation numérique.

Dans le cas des rétroactions, une cascade de modèles qui intègrent différents compartiments à différentes échelles est souvent nécessaire, avec la difficulté de faire interagir les disciplines comme, par exemple, mettre des processus biologiques dans la physique en respectant les échelles. Autre exemple, dans les modèles du système Terre développés par les climatologues, certains comportements sont mieux connus que d'autres. Ainsi, ceux liés à la dynamique et la thermique sont assez convergents, mais ceux liés au sol et la biosphère le sont nettement moins. Cela pose la question de la généralité des modèles. Est-il pertinent de développer des modèles génériques ? Les modèles ne doivent-ils pas simplement être développés en fonction des questions scientifiques posées ? N'y a-t-il pas intérêt à préserver la diversité des modèles

pour appréhender leur stabilité, leur complexité, les incertitudes sur les simulations ? Comment faire dialoguer les modèles ? Un exemple pertinent est celui des modèles du GIEC développés par la communauté CMIP\* (Taylor *et al.*, 2012) qui a établi un cadre commun de simulations afin d'intercomparer les modèles et d'évaluer ainsi leurs performances. Ce travail est moins vrai en écologie (à l'exception du projet ISIMIP *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (Rosenzweig *et al.*, 2017)).

Quel que soit le modèle, il doit être transparent sur ses limites et son domaine de validité qui découlent des processus et des variables pris en compte, des données utilisées pour sa calibration, des conditions aux limites et des paramétrisations (souvent utilisées pour compenser le manque de connaissances sur certains processus). On souligne ici aussi l'intérêt du cadre bayésien qui permet d'inclure des informations qualitatives sur les paramètres (priors) avec des données quantitatives. Dans le cadre des modèles portant sur les rétroactions, ces questions sont d'autant plus importantes que ces phénomènes sont difficiles à observer et à quantifier. La technique d'assimilation des données peut ici être intéressante car elle permet à la fois de calibrer le modèle, là où des données existent, et d'estimer des données non existantes qui soient physiquement cohérentes avec les données existantes (réanalyses en climatologie). L'utilisation de l'intelligence artificielle pourrait permettre d'utiliser des « *big data* » pour l'amélioration des modèles numériques. Mais cela ne remplacera jamais l'expertise scientifique pour la connaissance des mécanismes.

La validation des modèles sur des données indépendantes est incontournable. Cela implique la réplique de jeux de données, mais le nombre possible de répliques dépend de l'échelle. Ainsi, pour un modèle global, un seul réplique (la Terre) est possible. Mais il existe des alternatives et les données paléoclimatiques en fournissent une. Un modèle qui reproduit bien la situation actuelle ne va pas forcément être capable de reproduire une situation plus froide comme le dernier maximum glaciaire ou plus chaude, comme l'optimum de l'Holocène. Des synthèses paléoclimatiques



aussi complètes que possible sont donc nécessaires pour effectuer les comparaisons. C'est l'objectif du programme PMIP\* (qui vient de fêter

ses 30 ans d'existence) qui est un programme d'inter-comparaison des modèles du système Terre sur le passé (Braconnot *et al.*, 2011).

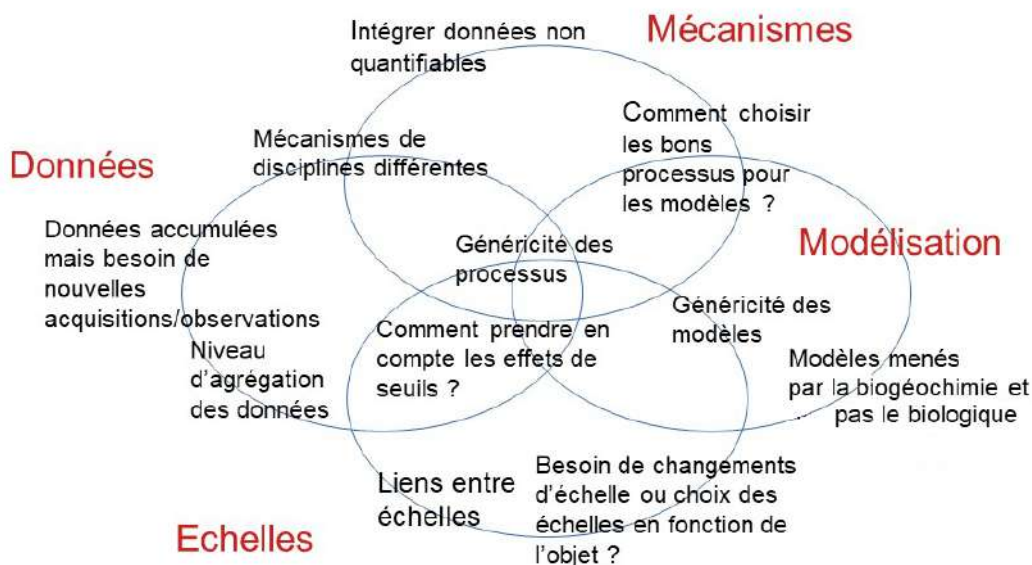
### La prise en compte des interactions entre les différentes échelles

Le fonctionnement des écosystèmes met en jeu diverses échelles, qu'elles soient physico-chimiques (de la molécule au géosystème), biologiques (du gène à l'écosystème), sociales (de l'individu à la population en passant par la communauté), temporelles (des périodes géologique et historique à l'actuel et à la scénarisation du futur) ou spatiales (du local au global) (Wu & Li, 2006). Les interactions entre ces différentes échelles et la modélisation des rétroactions restent un problème difficile à appréhender, en particulier parce que ces interactions sont non-linéaires. Certaines communautés scientifiques sont plus avancées que d'autres, par exemple les changements climatiques couplent des processus allant de la molécule au global, de la seconde au millénaire, avec des scénarios impliquant des politiques d'atténuation qui mettent en jeu des comportements humains et des négociations géopolitiques. L'écosystème et les territoires se trouvent au centre de cette complexité. Nous avons souligné l'intérêt du temps long, notamment pour appréhender les rétroactions. Mais si le recours au passé à différentes

échelles de temps est un moyen de comprendre les évolutions des systèmes sous l'effet de forçages extérieurs, qui souvent agissent à grande échelle, les données du passé sont souvent incomplètes et ponctuelles. Elles restent néanmoins souvent importantes à considérer.

Si, en physique, il existe des lois qui permettent de passer, par exemple, de l'échelle moléculaire à l'échelle macroscopique, en biologie, les représentations sont nettement plus complexes. Par exemple, dans un écosystème il y a les acteurs et les composantes de la biodiversité mais aussi toutes leurs interactions. Cela implique un grand nombre de variables qui peuvent changer au cours du temps ce qui influencera les interactions. À cela, il faut ajouter les variables abiotiques, les interactions entre échelles...

Schéma synthétique des interactions entre les approches des systèmes complexes. Source : Samuel Abiven



Dans de tels systèmes complexes, il n'est donc pas toujours possible de se baser sur des lois de causalité, en particulier quand il s'agit de systèmes socio-écologiques impliquant des différences d'échelle sociologiques (individu, communautés, ethnies) ou des frontières géographiques avec des aspects juridiques et des pressions anthropiques variables ; on atteint rapidement des niveaux de complexité sans commune mesure avec ceux des systèmes purement physiques. Enfin, les échelles académiques et industrielles

ou sociétale impliquent également des échelles temporelles associées à des modes de travail différents, sans parler des différences de langages qui ajoutent des barrières supplémentaires. La mise en œuvre d'une interdisciplinarité forte et co-construite reste encore indispensable, longtemps après les premiers Programmes Interdisciplinaire de Recherche en Environnement (PIREN), dont le PIREN-Seine (qui a été intégré à une Zone Atelier), est l'un des plus durables (depuis 35 ans) (Billen *et al.*, 1994).

## Questions de recherches futures

Lors de nos échanges, nous avons dégagé un certain nombre de questions et de futures directions de recherche. Tout d'abord, nous avons noté la nécessité de pousser encore l'interdisciplinarité pour intégrer une diversité de processus (différentes échelles, de la physique à l'humain). Cette interdisciplinarité est une condition *sine qua non* pour aborder les socio-écosystèmes de manière holistique et systémique. Pour répondre aux enjeux sociétaux, les rétroactions amplifiées par les activités humaines doivent pouvoir être modélisées. Il est en effet crucial de déterminer quelles seront les ressources disponibles pour un fonctionnement futur souhaitable des écosystèmes.

S'agissant des données, l'utilisation de nouvelles approches, comme l'assimilation des données et leurs réanalyses doivent se généraliser, pour permettre de combler les hiatus dans les chroniques. Dans le même registre, l'inversion des modèles - qui permet d'estimer certaines entrées du modèle connaissant certaines sorties - est une approche prometteuse. Les larges jeux de données ou *big data* ont un intérêt certain, mais les données plus qualitatives doivent aussi être considérées. Pour bien comprendre des dynamiques sur le très long terme, les données anciennes de type paléoécologiques sont très importantes, même si elles sont parfois fragmentées. Les techniques d'assimilation évoquées ci-dessus ont toutes leur place.

Il est également ressorti de notre atelier que nous devons favoriser la co-construction des modèles

entre modélisateurs, expérimentateurs et utilisateurs, pour produire un ou des modèles utiles à la compréhension aussi bien des données que des modèles et pour produire une aide réelle à la décision socio-politique. L'implication, dès les premières étapes de la collecte des données, des différentes compétences permet de réfléchir en amont des hypothèses de travail. Nous avons aussi noté l'importance de garder la diversité des modèles pour évaluer l'incertitude, la stabilité, la complexité des processus, permettant notamment d'être transparent sur les conditions de validité. L'utilisation de l'intelligence artificielle, en particulier pour explorer des jeux de données complexes, ou pour relier des types de données très différentes, doit permettre une évolution de ces travaux, sous réserve de disposer des compétences et des ressources informatiques nécessaires. L'utilisation de modèles complexes peut être parfois (ou souvent) remplacée par des modèles simples et transparents, notamment dans le cadre de leur utilisation dans un contexte non académique.

Enfin, notre recherche et les données collectées doivent être en accord avec les enjeux de nos sociétés. Ainsi, il est important de prendre en compte des questions émergentes comme la transition écologique ou la gestion environnementale dans un contexte soutenable et juste. Des actions comme celles portées par le Labos 1point5, ou des plans de gestion de données basées sur les principes FAIR\*, sont à inclure dans tous nos programmes de recherche (Schöpfel *et al.*, 2018).

## Verrous à lever

Notre atelier a mis en évidence certains besoins spécifiques au thème des rétroactions. Nous avons mis en avant l'importance de la collecte de données sur le long terme, et donc l'importance des observatoires fonctionnant sur la longue durée, avec des ressources humaines dédiées et valorisées et des financements permettant une pérennité de la collecte d'information. Les financements de ces observatoires doivent être hors des projets à durée limitée. Cela implique en particulier des synergies approfondies entre CNRS Écologie & Environnement et CNRS Terre & Univers. Il est aussi très important d'assurer la continuité de la gestion des données, de plus

en plus nombreuses, et bientôt uniquement compréhensibles par des algorithmes de plus en plus complexes et abstraits. Cela passe par le maintien d'unités d'appui et de recherche permettant ce travail. Enfin, ce travail de prospective mérite de poursuivre la réflexion sur l'intégration de la complexité des systèmes et de leur résilience, par exemple dans le cadre de projets PEPR se mettant en place. Les discussions ont également montré que les modèles doivent être, non seulement transparents dans leur conception, mais visibles dans les sphères politiques, gestionnaires et citoyennes, au-delà des communautés scientifiques.

## RÉFÉRENCES

- Abiven, S., Altermatt, F., Backhaus, N., Deplazes-Zemp, A., Furrer, R., Korf, B., et al. (2017). Integrative research efforts at the boundary of biodiversity and global change research. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 29, 215–222.
- Billen, G., Garnier, J. & Hanset, P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the RIVERSTRALHER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289, 119–137.
- Braconnot, P., Harrison, S.P., Otto-Bliesner, B.L., Abe-Ouchi, A., Jungclaus, J. & Peterschmitt, J.-Y. (2011). The Paleoclimate Modeling Intercomparison Project contribution to CMIP5. *CLIVAR Exch.*, 16, 15–19.
- Powers, S.M. & Hampton, S.E. (2019). Open science, reproducibility, and transparency in ecology. *Ecol. Appl.*, 29, 1–8.
- Rosenzweig, C., Arnell, N.W., Ebi, K.L., Lotze-Campen, H., Raes, F., Rapley, C., et al. (2017). Assessing inter-sectoral climate change risks: The role of ISIMIP. *Environ. Res. Lett.*
- Schöpfel, J., Ferrant, C., Andre, F., Fabre, R., Schöpfel, J., Ferrant, C., et al. (2018). Research data management in the French National Research Center (CNRS). *Data Technol. Appl.*, 52, 248–265.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
- Wu, J. & Li, H. (2006). Concepts of scale and scaling. *Scaling Uncertain. Anal. Ecol. Methods Appl.*, 3–15.



# Les Pôles

*Auteurs : Emilie Gauthier (Chrono-environnement), Catherine Larose (Ampère), Jérôme Fort (LIENSs).*

*Contributeurs : Irina Alekhina (Arctic and Antarctic Research Institute), Claire Alix (ArchAm), Fabrice Bertile (IPHC), Sylvie Beyries (CEPAM), Anne-Kristel Bittebiere (LEHNA), Sylvie Blangy (CEFE), Eva Bucciarelli (LEMAR), Paco Bustamante (LIENSs), Laurent Chauvaud (LEMAR), Anne Choquet (AMURE), François Criscuolo (IPHC), Holly Donohoe (LIENSs), Christine Dupuy (LIENSs), Camille Escude Joffres (CERI), Sara Fleury (LEGOS), Emmanuèle Gautier (LGP), Eugénie Gauvrit-Roux (CEPAM), David Gremillet (CEFE), Mélanie Grenier (LEGOS), Yan Axel Gomez Coutouly (Préhistoire et Technologie), Sophia V. Hansson (LEFE), Auréade Henry (CEPAM), Dimitri Kalenitchenko (LIENSs), Niklas Labba, Annie Lamalice (CEFE), Johann Lavaud (LEMAR), Vincent Le Fouest (LIENSs), Michael Leone, Gael Le Roux (LEFE), Aude Leynaert (LEMAR), Grégor Marchand (CReAAH), François Massol (CIIL), Laurent Memery (LEMAR), Brivaela Moriceau (LEMAR), Mikael Pirak, Frédéric Planchon (LEMAR), Hélène Planquette (LEMAR), Philippe Pondaven (LEMAR), David Renault (ECOBIO), William Rendu (ZooSCAn), Pascal Rivière (LEMAR), Géraldine Sarthou (LEMAR), Jeroen Sonke (Géosciences Environnement Toulouse), Jill Sutton (IUEM), Roman Teisserenc (LEFE), Julien Thébault (LEMAR), Timothy Vogel (Arctic and Antarctic Research Institute).*

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ **Développer une intégration plus holistique des champs de recherche entre espèces, mais aussi entre écosystèmes**
- ▶ **Favoriser la co-construction des projets avec les communautés autochtones en intégrant des passerelles scientifiques entre l'actuel et le passé**
- ▶ **Investir dans les infrastructures et leur maintien pour permettre une recherche de qualité et l'observation des socio-écosystèmes sur le long terme**

## Préambule

Cet atelier s'intéressait non pas à une question de recherche spécifique mais à un objet : les pôles, représentant l'Arctique et le subarctique, l'Antarctique et le subantarctique. Cet exercice de prospective ne peut donc pas suivre un schéma classique commençant par un état de l'art complet autour des problématiques de recherche polaires, la plupart des thèmes abordés au cours des Prospectives pouvant s'y retrouver. Par ailleurs, si Arctique et Antarctique ont en commun un environnement polaire extrême, ils restent différents en de nombreux points. Par exemple, la recherche française en Arctique dépend entièrement de collaborations internationales, en particulier avec les pays arctiques, contrainte moins forte en Antarctique. Contrairement à l'Antarctique et au subantarctique,

l'Arctique est un territoire habité par de nombreuses communautés autochtones où les relations homme-milieu sont donc une composante importante. Néanmoins, recherches arctiques et antarctiques ont aussi de nombreux points communs et doivent se nourrir l'une-l'autre.

Par ailleurs, cet exercice de prospective s'est fait dans un contexte d'intérêt croissant pour les régions polaires : à la fois sur la scène nationale, la France ayant par exemple publié au printemps 2022 sa première Stratégie Polaire à l'horizon 2030 « Équilibrer les extrêmes » ; mais aussi européenne et internationale via les différentes instances et organisations arctiques et antarctiques existantes (*Arctic Council, Scientific Committee on Antarctic Research, International Arctic Science Committee, European Polar Board...*).

## Contexte

Les écosystèmes polaires (Arctique et Antarctique) sont actuellement parmi les plus impactés par le changement global (Bennett *et al.*, 2015 ; Overland *et al.*, 2019 ; Previdi *et al.*, 2021). Par ailleurs, leur vulnérabilité a tendance à s'accroître sous l'intensification des activités humaines tant aux échelles globales que locales (Poland *et al.*, 2003 ; Bartsch *et al.*, 2021). L'évolution de la cryosphère, le réchauffement des masses d'eau ou encore l'augmentation des polluants impliquent des modifications drastiques des écosystèmes marins (Belkin, 2009 ; McKinney *et al.*, 2015). Les écosystèmes terrestres subissent également de profonds changements liés par exemple à la fonte du pergélisol ou à l'augmentation des précipitations (Convey, 2006 ; Oliva & Fritz, 2018 ; Jonasson *et al.*, 2019). Dans ces régions sensibles, les forçages anthropiques peuvent aussi impacter le climat et les écosystèmes sur des échelles globales avec une intensité d'autant plus forte que les rétroactions non linéaires y jouent un rôle prépondérant (glace - albedo, pergélisol - méthane...). Ces bouleversements peuvent être appréhendés à la lumière des évolutions passées, une démarche de rétro-

observation des écosystèmes et des interactions sociétés - environnement permet de mesurer plus précisément l'ampleur du changement actuel (Pisaric & Smol, 2021). Cette recherche en zones polaires doit aussi s'inscrire aujourd'hui dans une démarche transversale et pluridisciplinaire, en prenant par exemple en compte les populations autochtones de l'Arctique, dans le but de les intégrer à la démarche scientifique et d'aller vers un partage et une coproduction des savoirs (Huntington *et al.*, 2004 ; Armitage *et al.*, 2011 ; Yua *et al.*, 2022). Le réchauffement rapide des pôles a déjà des impacts significatifs directs sur les espèces, la disponibilité et la structure des ressources et les populations humaines (santé, régime alimentaire, virus...), ce qui produira nécessairement des crises sociales et politiques, dont les prémisses sont déjà présentes (Crate & Nutall, 2016). La gouvernance internationale de ces régions en pleine évolution constitue un enjeu fondamental pour les années à venir.

Cet atelier a reçu douze contributions écrites et une cinquantaine de personnes ont participé aux échanges lors des prospectives à la Rochelle en octobre 2022.



Les contributions, puis les discussions, se sont organisées autour de cinq grands thèmes :

- Spécificité des écosystèmes polaires : vers une meilleure intégration des sciences multi-échelles
- Quels besoins en termes d'infrastructures ?
- Comment favoriser les interactions chercheurs/sociétés ?
- Étudier le passé pour comprendre le présent dans un contexte de changement global
- Des chercheurs écoresponsables

Les chercheurs présents lors de cet atelier appartenaient à des champs disciplinaires diversifiés de CNRS Écologie & Environnement mais aussi de CNRS Sciences humaines & sociales et de CNRS Terre & Univers, et travaillaient en Arctique comme en Antarctique.

## Spécificité des écosystèmes polaires : vers une meilleure intégration des sciences multi-échelles ?

### Données à long terme et continuum Terre-Mer

Les océans polaires sont au cœur d'une mutation environnementale profonde en cours ; ils sont à la fois des témoins et des acteurs majeurs du changement climatique global. Ils sont/seront le lieu de changements écologiques majeurs encore mal connus, et potentiellement amplifiés par des mutations économiques et géopolitiques d'envergure internationale. Il est donc indispensable de mieux comprendre l'évolution des océans tout au long du continuum terre-mer, et la modification de ces nouveaux paysages biogéochimiques qui conditionnent fortement la vie dans les eaux polaires, tant en milieu côtier qu'en milieux hauturiers.

Le manque de données à long terme sur les communautés benthiques et pélagiques a été souligné. Malgré la présence d'études ponctuelles (Terre Adélie par exemple) il manque souvent les mesures physico-chimiques en continu (*i.e.* température, nutriments, salinité). Les chercheurs ont également fait remonter le peu de données sur le transport de la matière organique et, plus généralement, le manque d'études sur le lien entre le système terre-mer en termes de flux de matière. Ce manque de données et d'études peut être attribué en partie à une focalisation pas assez importante sur les composantes

basales des niveaux trophiques. Différentes propositions ont été apportées en réponse à ces questions, en particulier le besoin de maintenir, préserver et soutenir la collecte de séries à long terme, bien que cela implique parfois des contraintes d'ordre économique et politique. Il semble aussi urgent de sortir du champ monodisciplinaire et de se focaliser sur des problématiques englobant le continuum terre-mer et mer-terre pour intégrer plus de niveaux trophiques de façon holistique.

### Les études biologiques

Les organismes polaires, vivant dans des milieux extrêmes, sont des sentinelles des changements des écosystèmes. Plusieurs contributions et une partie des discussions ont soulevé l'importance des études biologiques afin de mieux comprendre les réponses adaptatives des organismes aux changements environnementaux, tout en considérant la multiplicité des facteurs de stress environnementaux et de leurs effets conjoints (ex. invasions biologiques, changements climatiques, pollutions). Le développement d'approches telles que les omiques reste nécessaire pour une compréhension holistique de ces réponses tout en permettant d'aborder d'autres questionnements tels que les processus de vieillissement des organismes sous contraintes environnementales.

L'utilisation d'espèces indicatrices, intégratrices des changements climatiques et de ses impacts sur les écosystèmes polaires sur le temps long, telles que les communautés microbiennes dans des archives sédimentaires, doit également se développer. Les connaissances sur les cycles biologiques et les facteurs biotiques et abiotiques les influençant sont particulièrement absentes pour la plupart des espèces marines autres que des oiseaux et des mammifères, en partie à cause de la difficulté d'accès à ces écosystèmes pour une partie de l'année. Les études en écologie fonctionnelle doivent donc être renforcées, car pour certains objets d'étude, les approches relèvent encore trop de la biogéographie et ou d'une approche mécanistique. Un développement de l'écologie expérimentale doit accompagner cet effort, ainsi qu'une meilleure intégration des études qui s'effectuent à divers niveaux écologiques.

### Les nouveaux forçages

Aux thématiques de recherche développées ci-dessus viennent désormais s'ajouter de nouvelles problématiques liées à de nouveaux forçages comme le tourisme, l'activité minière, la pêche, l'aviation et l'augmentation du potentiel d'introduction d'espèces invasives. Jusqu'à présent, les travaux de recherche se sont principalement concentrés sur les changements à grande échelle de la répartition et de l'abondance des espèces, selon différents scénarios de changement climatique et d'invasions biologiques. Cependant, il est capital de connecter ces travaux à des observations et des prédictions réalisées à des échelles géographiques plus fines, voire à l'échelle micro-locale afin de refléter les conditions réellement subies par les organismes. Il faut donc développer les nouveaux outils d'observation comme la télédétection dans des zones

non habitées. Cela permettrait de construire des modèles de distribution prédictifs plus réalistes des effets des changements climatiques, des invasions biologiques et des actions de gestion adaptées pour la biodiversité polaire.

### Conservation vs. recherche fondamentale

Il existe un conflit entre la conservation et la recherche fondamentale. La conservation limite parfois la recherche fondamentale (éthique de la conservation bio-centrée vs. la conservation éco-centrée). Faire de la recherche n'est pas la même chose que de vouloir conserver ; la politique de la conservation n'est pas toujours claire et la sanctuarisation limite la recherche, alors qu'il est nécessaire de comprendre pour protéger (améliorer le lien entre la recherche et la conservation). La question est donc de savoir ce que l'on veut maintenir, sachant que les pôles sont en train de changer rapidement. CNRS Écologie & Environnement pourrait avoir une politique plus claire à ce sujet. En conclusion de cette première session, il paraît nécessaire de favoriser les approches pluridisciplinaires et transversales afin de coupler les études sur les différents niveaux trophiques, en incluant les maillons à la base des réseaux trophiques. Il paraît également indispensable de soutenir l'IPEV\*, les besoins en ressources humaines et de renforcer l'inter/pluridisciplinarité au sein de CNRS Écologie & Environnement pour faire face aux problématiques polaires. Les chercheurs sont conscients que les contraintes en Arctique et en Antarctique ne sont pas les mêmes, car la recherche en Antarctique est soumise à une gestion 100 % française, alors qu'en Arctique, l'implication de plus d'acteurs internationaux est nécessaire, ce qui entraîne une recherche plus diffuse avec des projets plus divers, mais moins en interaction.

## Quels besoins en termes d'infrastructures ?

### Le Groenland

Le Groenland reste relativement inexploré par rapport à ses voisins arctiques, la recherche environnementale y étant souvent entravée par le manque de soutien logistique et infrastructurel

local. Il est cependant plus difficile de mettre en place des stations en zone arctique, car l'implémentation ne se fait pas sur des territoires français. Pour le marin, il existe des plateformes pour favoriser l'accès à l'infrastructure (programme européen ARICE, partenariat Flotte Océanogra-

phique Française - Amundsen Science). Un programme pan-Arctique (INTERACT) a également pour objectif de promouvoir le partage et l'accès aux stations de recherche terrestres. Il apparaît donc important que CNRS Écologie & Environnement encourage et favorise l'utilisation de ces outils et infrastructures à l'échelle de l'Arctique. Au Groenland, il semble néanmoins important que le CNRS s'associe à l'Institut Polaire Français pour un investissement plus spécifique dans les infrastructures de recherche et l'établissement d'une station de recherche française, et ce en étroite collaboration avec les autorités groenlandaises et danoises.

### **Antarctique et subantarctique**

Une des limitations de la recherche scientifique est liée au manque de moyens infrastructurels pour réaliser dans de bonnes conditions des observations, mesures et prélèvements de terrain de base ; divers exemples illustrent ce fait, comme la rénovation de la base de DDU prévue à l'horizon 2050 ou les stations subantarctiques (ex. Kerguelen), où une dégradation de la qualité du travail a été observée avec une législation

plus contraignante, ainsi qu'un manque de petits bateaux pour explorer et étudier les îles autour de la Grande Terre. La question du remplacement du Marion Dufresne a aussi été discutée : quel sera le choix stratégique de la France, sachant que le bateau ne sera plus en service à partir de 2032 ?

Plusieurs solutions sont avancées :

- favoriser la mise à disposition des réseaux des chercheurs pour faciliter l'accès aux infrastructures ;
- une meilleure intégration de la recherche terrestre et marine pour partager des ressources et favoriser l'interdisciplinarité ;
- labelliser les centres d'observations en écologie, car l'ANR ne finance pas le monitoring ou l'observation sur le long terme, essentielle dans le contexte de changement global ;
- outre le besoin de développer les mesures, il faut augmenter les moyens humains car il y a un essoufflement des personnels.

Une seule contribution écrite faisait référence aux infrastructures polaires et cette thématique méritait une discussion plus approfondie.

## **Comment favoriser les interactions scientifiques /sociétés ?**

La recherche scientifique éveille la curiosité et aide le grand public à améliorer sa connaissance des pôles. Sur le terrain en Arctique, les projets doivent être, dans la mesure du possible, co-construits avec les populations autochtones et répondre à des préoccupations sociétales. Il est donc nécessaire de développer et de questionner nos pratiques afin de mettre en place une co-construction sur le temps long. Les méthodologies, ancrées dans les savoirs locaux, pourront alors être utilisées dans le cadre d'approches participatives afin de favoriser l'émergence de nouveaux savoirs. Localement, les actions de science participative, qui peuvent être développées, favorisent une acquisition plus régulière des données, à condition de s'assurer de leur qualité et, le cas échéant, de pouvoir extraire une information objective d'un savoir non-acadé-

mique. Cette implication des populations dans les projets de recherche nécessite l'utilisation de protocoles éthiques adaptés aux contextes des différentes recherches. Des ateliers en mode de Recherche Action Participative visant à porter un regard critique sur l'impact des changements globaux sur les styles de vie traditionnels et l'avenir des jeunes ont, par exemple, été développés conjointement avec les Inuits et les Samis. Les chercheurs présents avancent l'idée de bourses d'études CNRS Écologie & Environnement pour de jeunes autochtones afin de favoriser la recherche. De manière plus générale, il est également nécessaire de soutenir la recherche polaire dans un contexte d'enjeux sociétaux intégrant également le droit international, la sécurité environnementale, la défense, la géopolitique.

## Étudier le passé pour comprendre le présent dans un contexte de changement global

### Sauvegarder un patrimoine plurimillénaire

En Arctique comme en Antarctique, les études de rétro-observations utilisant divers paramètres biotiques ou abiotiques sont indispensables, quelle que soit l'archive utilisée, glaciaire ou sédimentaire. La communauté scientifique est très consciente de la course contre la montre qui s'est engagée pour la sauvegarde de certains sites d'études menacés, entre autres, par la fonte du pergélisol, l'érosion des sols, la montée du niveau marin et les perturbations diverses.

En ce qui concerne plus précisément les sites archéologiques, les objectifs sont désormais de dépasser les modèles généraux de peuplement et de subsistance pour décrypter plus finement les pratiques socio-environnementales des sociétés de chasseurs-pêcheurs-collecteurs et pour mettre en lumière les spécificités régionales et chronologiques. Cette démarche passe par une approche interdisciplinaire et multiparamètres. L'étude des archives sédimentaires naturelles (lacs, tourbières...) ou culturelles (sols archéologiques, écofacts et artefacts) qui comprennent une grande diversité de proxys, pose depuis quelques mois un problème majeur lié à l'interdiction de leur importation. De nombreuses études sont donc suspendues en raison de cette impossibilité de rapatrier les échantillons, en particulier les carottes et mono-

lithes sédimentaires, mais aussi un vaste ensemble d'échantillons de petite taille. Le CNRS s'est emparé de ce problème et la communauté scientifique espère une issue rapide.

### Vers une meilleure collaboration entre écologie, anthropologie et archéologie

Les approches paléoenvironnementales paraissent souvent sous-utilisées dans les questions écologiques, il paraît donc important de créer des passerelles scientifiques plus nombreuses entre l'actuel et le passé. Il serait intéressant d'intégrer les démarches paléoenvironnementales de manière plus systématique dans les approches écologiques et réfléchir à mettre en place des rétro-observatoires (ex. observatoire de la zone critique). Ce lien entre le passé et le présent doit également se faire au niveau des sciences humaines et sociales (collaborations entre archéologues et anthropologues, voire sociologues, ethnoarchéologues). Ces différentes approches ne peuvent se faire sans l'accord voire l'appui des populations locales. Il semble d'une part nécessaire de mieux diffuser les résultats des études mais aussi d'impliquer plus largement les populations locales dans différentes démarches et réflexions (par exemple, la protection de ces sites) et voire, dans certains cas, de s'appuyer sur leur demande.

## Des recherches écoresponsables

La question d'une recherche plus écoresponsable est un sujet prégnant pour les chercheurs. Les recherches menées dans les zones polaires visent à comprendre et atténuer les dommages environnementaux tout en favorisant indirectement par le biais, entre autres, des déplacements. La question d'adopter, voire d'imposer de nouveaux comportements est posée afin de minimiser ces impacts et de répondre aux interrogations de la société. Deux suggestions sont avancées. Il est proposé d'abord d'identifier des

questions essentielles relatives à la recherche polaire. Il semble nécessaire d'améliorer les modalités de recherche (ex. les types d'équipements, le partage de ressources, les prélèvements mutualisés) et d'améliorer la mise à disposition des données (ex. laboratoires LTER\*) en développant des approches complémentaires - mais pas forcément neutre d'un point de vue bilan carbone - telles que la modélisation, l'observation à distance, les capteurs communicants et la collaboration.

L'idée de produire un document commun destiné au grand public et aux décideurs, expliquant pourquoi les missions de terrain en régions polaires sont nécessaires, ne fait pas l'unanimité. Cette démarche pourrait cependant s'intégrer plus globalement dans le collectif labos 1point5 mis en place par le CNRS. Les arguments sont différents pour l'Arctique et l'Antarctique mais aussi en fonction des disciplines et impliquent également des considérations géopolitiques, sociétales...

Enfin, se pose la question de la collaboration entre la recherche polaire et des opérateurs privés (ex. compagnies de transport maritime, tour-opérateurs) qui font des régions polaires une approche commerciale. La communauté de recherche est partagée sur cette question qui pose un problème éthique, sachant que ces opérateurs ont un impact important sur l'environnement. Le CNRS doit s'emparer de cette question et avoir une position claire.

## Conclusion

De cet atelier dédié à la recherche polaire, divers points semblent ressortir plus particulièrement : le soutien d'approches interdisciplinaires, le besoin d'un renforcement du soutien logistique et infrastructurel, la mise en place de protocoles éthiques pour appréhender les

démarches de coproduction des savoirs, le développement d'une démarche collective plus écoresponsable, l'intérêt d'une stratégie polaire française. Un appel à projets ANR dédié aux pôles représenterait une initiative très appréciée.

## RÉFÉRENCES

- Armitage, D., Berkes, F., Dale, A., Kocho-Schellenberg, E., & Patton, E. (2011). Co-management and the co-production of knowledge: Learning to adapt in Canada's Arctic. *Global environmental change*, 21(3), 995-1004.
- Bartsch, A., Pointner, G., Nitze, I., Efimova, A., Jakober, D., Ley, S., Högström E., Grosse, G., Schweitzer, P. (2021). Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. *Environ. Res. Lett.*, 16(11), 115013.
- Belkin, I. M. (2009). Rapid warming of large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 81(1-4), 207-213.
- Bennett, J. R., Shaw, J. D., Terauds, A., Smol, J. P., Aerts, R., Bergstrom, D. M., ... & Possingham, H. P. (2015). Polar lessons learned: long term management based on shared threats in Arctic and Antarctic environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(6), 316-324.
- Convey, P. (2006). Antarctic Climate Change and its Influences on Terrestrial Ecosystems. In: Bergstrom, D.M., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds) *Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems*. Springer, Dordrecht.
- Crate, S. A., & Nuttall, M. (Eds.). (2016). *Anthropology and climate change: from encounters to actions*. Routledge. 415 pp.
- Huntington, H., Callaghan, T., Fox, S., & Krupnik, I. (2004). Matching traditional and scientific observations to detect environmental change: a discussion on Arctic terrestrial ecosystems. *Ambio*, 33(sp13), 18-23.
- Jonasson, S., Callaghan, T. V., Shaver, G. R., & Nielsen, L. A. (2019). Arctic terrestrial ecosystems and ecosystem function. In *The Arctic*. Routledge, pp. 275-313.
- McKinney, M. A., Pedro, S., Dietz, R., Sonne, C., Fisk, A. T., Roy, D., Jenssen B. M., & Letcher, R. J. (2015). A review of ecological impacts of global climate change on persistent organic pollutant and mercury pathways and exposures in arctic marine ecosystems. *Current Zoology*, 61(4), 617-628.
- Oliva, M., & Fritz, M. (2018). Permafrost degradation on a warmer Earth: Challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 14-18.
- Overland, J., Dunlea, E., Box, J. E., Corell, R., Forsius, M., Kattsov, V., Skovgård Olsen, M., Pawlakh, J., Reiersen, L-O. & Wang, M. (2019). The urgency of Arctic change. *Polar Science*, 21, 6-13.
- Parmentier, F. J. W., Christensen, T. R., Rysgaard, S., Bendtsen, J., Glud, R. N., Else, B., van Huissteden, J., Sachs, T., Vonk, J. E. & Sejr, M. K. (2017). A synthesis of the arctic terrestrial and marine carbon cycles under pressure from a dwindling cryosphere. *Ambio*, 46, 53-69.
- Pisaric, M., & Smol, J. P. (2021). Arctic ecology—A Paleoenvironmental perspective. *Arctic Ecology*, 23-55.
- Poland, J. S., Riddle, M. J., & Zeeb, B. A. (2003). Contaminants in the Arctic and the Antarctic: a comparison of sources, impacts, and remediation options. *Polar Record*, 39(4), 369-383.
- Previdi, M., Smith, K. L., & Polvani, L. M. (2021). Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett.*, 16(9), 093003.
- Yua, E., Raymond-Yakoubian, J., Daniel, R. A., & Behe, C. (2022). A framework for co-production of knowledge in the context of Arctic research. *Ecology and Society*, 27(1:34), 24pp.





Scientifique à côté de la station météo de la plateforme PLANAQUA, au CEREER. Cette plateforme expérimentale nationale en écologie aquatique est axée sur l'étude écologique expérimentale des systèmes aquatiques continentaux. Crédit : © Cyril FRESILLON/ CEREER/CNRS Images



Les

**défis**

**méthodologiques**

et leurs outils

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023

# 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.

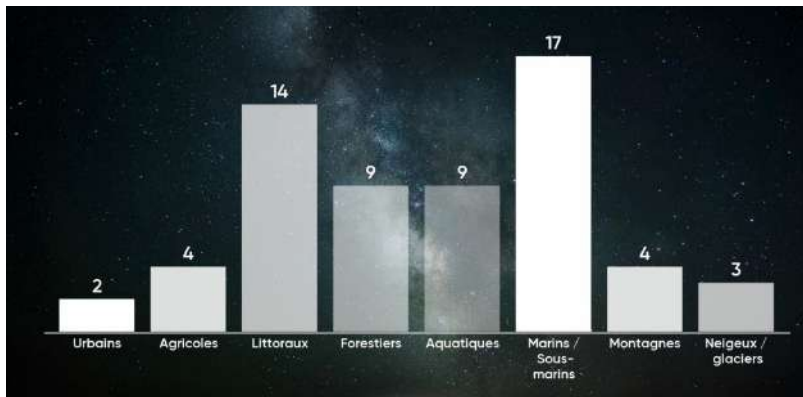


Figure 1. Répartition des biomes étudiés par les 32 répondants au questionnaire de l'atelier « Observation à distance ».

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)

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 ?

## 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/>).

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 développements 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/](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 prioritaires.

### 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 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.
- Lecoq, T., Longuevergne, L., Pedersen, H. A., Brenguier, F., Stammler, 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.
- Litleskare, 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.



# Données, après l'acquisition

Auteurs : Arnaud Elger (LEFE), Émilie Lerigoleur (GEODE), Bruno Mansoux (BBEES), Alain Queffelec (PACEA)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Co-construire avec les divers acteurs une stratégie de gestion des données aux différentes étapes de leur cycle de vie, dans une perspective d'efficacité et de sobriété numérique
- ▶ Mettre en place une politique de formation des personnels à la démarche de planification, de gestion et de diffusion des données FAIR - prioritairement ciblée vers les correspondants OpenDoRES des unités
- ▶ Développer et permettre l'appropriation par la communauté de nouveaux outils de traitement collaboratif des données (ex. lacs de données, environnements virtuels de recherche)

## État des lieux

### Contexte et problématique

Selon l'OCDE\* (2007), les données de la recherche sont définies comme des « enregistrements factuels (chiffres, textes, images et sons), qui sont utilisés comme sources principales pour la recherche scientifique et sont généralement reconnus par la communauté scientifique comme nécessaires pour valider les résultats de la recherche ».

Les scientifiques produisent des données dès qu'ils réalisent une observation ou prélèvent un échantillon sur le terrain ou en conditions contrôlées. Les données sont également de plus en plus souvent issues de systèmes automatisés (ex. capteurs connectés), générées par des simulations numériques ou produites par les citoyens au travers des « sciences participatives » ou des « observations opportunistes ». L'ensemble de ces données, ainsi que diverses informations renseignant le contexte dans lequel elles ont été acquises (métadonnées), sont stockées dans des bases de données et/ou disponibles sous forme de fichiers.

Dans le cadre du Plan national pour la science ouverte (PNSO 2018, 2021) et des diverses feuilles de route institutionnelles, les données (au moins celles vouées à la diffusion) doivent être facilement trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables selon les principes FAIR\* (Wilkinson *et al.*, 2016). Elles doivent pouvoir être identifiées de façon unique et pérenne en leur associant des PID\*, afin de permettre leur suivi dans le cadre d'une utilisation ultérieure. Il faut également qu'elles soient décrites selon des formats standardisés (ex. INSPIRE, *Dublin core*, *Darwin core*...) et des thésaurus\*/ontolo-

gies\* partagés, et stockées dans des formats de fichier ouverts (ex. CSV, TXT, XML, JSON) garantissant leur réutilisation hors du contexte dans lequel elles ont été acquises, et ce pour une durée pouvant théoriquement aller jusqu'à plusieurs décennies.

Les données sont au cœur d'un cycle qui, de leur acquisition à leur réutilisation, passent par des étapes clés comme la documentation, la conservation et l'exposition. Ce cycle de vie implique par ailleurs diverses compétences techniques liées notamment à la curation des données, encore insuffisamment (re)connues au sein des communautés scientifiques : sécurisation, formatage, accessibilité, pérennité et écoresponsabilité.

De nombreux outils et services sont mis à disposition de la communauté scientifique pour faciliter le flux d'informations entre chaque étape de ce cycle de vie. Les lacs de données et les environnements virtuels de recherche (EVR\*) font partie des solutions d'avenir pour une gestion intégrée et interopérable des données qu'il reste à explorer.

Comment la communauté scientifique et technique de CNRS Écologie & Environnement s'approprie-t-elle les nouvelles pratiques de gestion FAIR (autant que possible) des données dans le contexte de la science ouverte ? Comment les scientifiques pratiquent-ils cette gestion au travers des plans de gestion de données\* ? Quels sont les entrepôts de données\* ou les infrastructures de recherche\* (IR) où ils exposent et diffusent leurs données ? En quoi les pratiques des autres Instituts du CNRS peuvent nous conduire à faire évoluer les nôtres ?

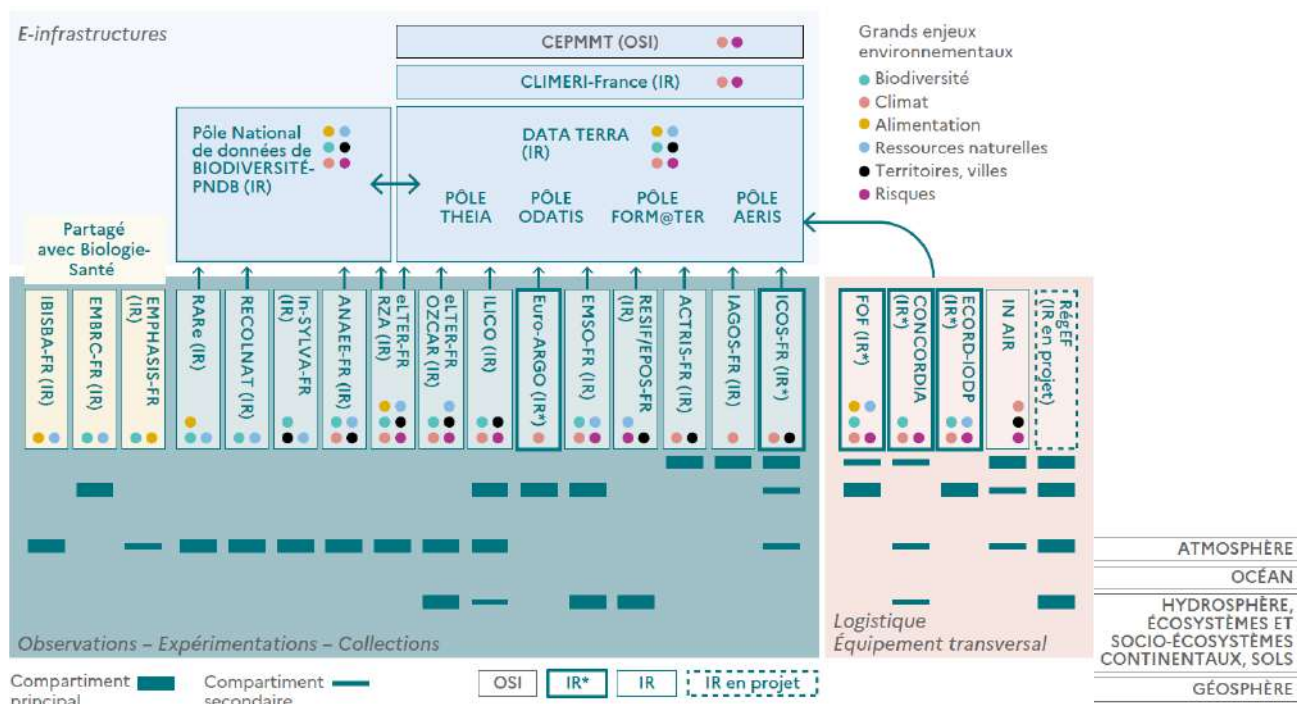
### Un paysage d'infrastructures et d'entrepôts en pleine évolution

Il existe une multitude d'infrastructures et d'entrepôts internationaux et nationaux dont une partie est identifiée dans la feuille de route nationale des IR du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (Figure 1).

Certaines offrent le stockage et la sauvegarde à moyen terme des jeux de données grâce au service d'entrepôt, d'autres permettent le catalogage de données, soit stockées physiquement

dans l'entrepôt adjacent soit dans des entrepôts distants. Un catalogue permet en effet d'exposer les jeux de données à travers leurs métadonnées et, par système de moissonnage, les catalogues sont interconnectés pour donner une plus grande visibilité aux données. Certaines IR permettent également le traitement de données par l'intermédiaire d'un EVR par exemple.





**Figure 1.**  
Feuille de route nationale des Infrastructures de Recherche.  
Source : Stratégie nationale des infrastructures de Recherche, 2021.

CNRS Écologie & Environnement développe des dispositifs spécifiques pour lesquels il a été proposé un cadre définissant les principes généraux d'utilisation, de stockage, de diffusion et de réutilisation des données (Politique des données des dispositifs et infrastructures de CNRS Écologie & environnement, juillet 2022 Callou et al., 2022). Ces dispositifs permettent d'observer, d'expérimenter, de modéliser le passé et le présent afin de comprendre le fonctionnement des socio-écosystèmes et d'en prédire l'évolution ; ils sont organisés en réseaux et leurs moyens sont mutualisés (voir annexes). On peut citer : le Réseau des Zones Atelier (RZA), les Observatoires Hommes-Milieu (OHM) du LabEx DRIIHM, le réseau des stations d'Ecologie expérimentale (ReNSEE), les sites d'étude en écologie globale (SEEG) et AnaEE France.

La communauté CNRS Écologie & Environnement interagit également avec d'autres infrastructures de recherche portées ou coportées par d'autres instituts du CNRS ou par des organismes étrangers (Figure 2). Le bilan ci-dessous reflète la complexité du paysage auquel sont confrontés les producteurs de données de CNRS Écologie & Environnement représentés par les participants à l'atelier.

Le projet structurant GAIA Data (EquipEx+ PIA3 2022-2030) est porté par trois ingénieurs de recherche (IR) inscrits sur la feuille de route nationale des IR CLIMERI-France, PNDB\*, Data Terra, et 21 autres partenaires. Il a pour ambition de développer et mettre en œuvre une plateforme intégrée et distribuée de services /données pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement (Les projets du programme d'investissement d'avenir, Data Terra\*\*).

Comment, du côté des infrastructures/dispositifs de recherche (co)portés par CNRS Écologie & Environnement, se met en place la formation aux bonnes pratiques de planification/stockage/diffusion des données et l'interopérabilité des solutions technologiques ? Quelles nouvelles compétences et quels nouveaux métiers émergent autour de la donnée ?

\*\* Les Les projets du programme d'investissement d'avenir. <https://www.data-terra.org/activites/projets-techniques-scientifiques/projets-nationaux/les-projets-du-programme-dinvestissements-davenir/>

Figure 2.  
Liste des infrastructures de recherche et des entrepôts utilisés par les participants à l'atelier.

Infrastructures de Recherche thématiques nationales	Plateformes ou infrastructures de Recherche thématiques internationales
InDoRES (Inventaire des Données de Recherche en Environnement) qui comporte deux outils : un catalogue de métadonnées (cat.InDoRES) et un entrepôt de données disciplinaire (data.InDoRES)	DEIMS-SDR : Dynamic Ecological Information Management System - Site and Dataset Registry
DATA TERRA : avec son catalogue et son futur entrepôt de données orphelines en sciences de la terre et de l'environnement (cf. projet EquipEx+ GAIA Data 2022-2030)	EMSO : European Multidisciplinary Subsea Observatory, réseau européen d'observatoires sous-marins pour l'environnement
PNDB : Pôle National de Données de Biodiversité	GBIF : pour les données mondiales de biodiversité
OneWater Data : dédiée aux eaux continentales et en projet dans le cadre du PEPR OneWater (2022 - 2032)	GenBank (NCBI) : pour les séquences génétiques et génomiques
Nakala (Huma Num CNRS-INSHS) : pour les données en sciences humaines et sociales	Pangaea : pour les données du système Terre et environnement
Entrepôts de données généralistes	Infrastructures de Recherche thématiques spécifiques
Dryad	OZCAR : Données de la zone critique
Figshare	ICOS : Mesure des flux et des concentrations de gaz à effet de serre
OpenAIRE	ACTRIS : Observation et exploration des aérosols, des nuages et des gaz réactifs et de leurs interactions
Open Science Framework OSF	ILICO : Recherche littorale et côtière
Zenodo	PRIDE : Données de protéomique issues de spectrométrie de masse

## État des connaissances et des pratiques de la communauté CNRS Écologie & Environnement

Cet atelier a permis d'évaluer le niveau de connaissance et les pratiques des participants via un sondage interactif comportant 25 questions et trois sujets principaux :

- le PDG\*,
- les principes FAIR,
- les nouvelles solutions collaboratives pour la gestion et le traitement des données, telles que les lacs de données ou les EVR\*.

L'atelier a réuni une cinquantaine de personnes (dont 21 DR/prof., 15 CR/MCF, 7 IR, 6 IE, 1 AI) dont les champs disciplinaires relèvent majoritairement de l'écologie, la génomique, l'environnement, la géographie, la microbiologie, l'écotoxicologie, la géomatique/téledétection, la bioinformatique, l'archéologie et l'anthropologie.

Le panel de participants manipule des données tabulaires (90 %), textuelles (58 %, incluant

les séquences génomiques), iconographiques (40 %), géographiques (35 %), vidéos (21 %) et sonores (10 %). La nature des données manipulées est donc extrêmement variée (Figure 3).

Concernant la planification de la gestion des données, plus de la moitié des personnes interrogées a contribué à au moins un DMP dans le cadre d'un projet de recherche (23 pers. - 68 %), pour une IR (7 pers. - 20 %) ou pour une unité (4 pers. - 12 %). Le DMP permet une meilleure anticipation de la gestion des données en optimisant leur structuration et leur pérennisation. Toutefois, le DMP est jugé comme trop chronophage pour la quasi-totalité des personnes sondées, les rubriques à remplir ne sont pas toujours claires et sont parfois inadaptées. Les leviers potentiels pour limiter ces inconvénients sont présentés en deuxième partie de la synthèse.



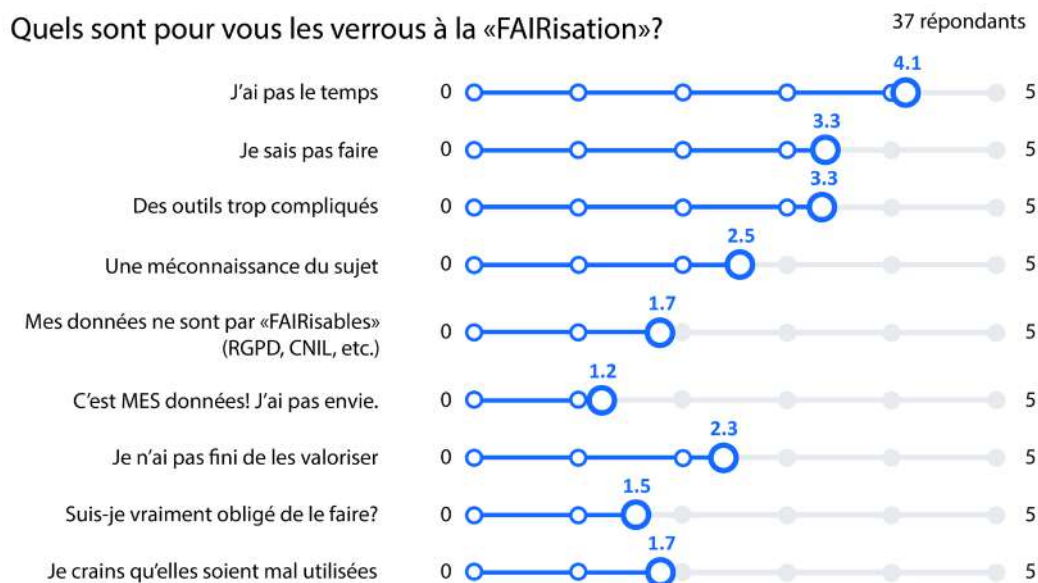


Figure 5.  
Les verrous à la « FAIRisation »  
des données (résultat du sondage,  
37 répondants).

Parmi les verrous identifiés dans la « FAIRisation » des données (Figure 5), beaucoup de personnes sondées expriment ne pas avoir le temps. D'autres reconnaissent des lacunes techniques ou ont besoin d'un délai pour le faire afin d'avoir le temps de les valoriser en amont. Les leviers potentiels sont abordés en deuxième partie.

Les lacs de données - encore très peu connus de la communauté de CNRS Écologie & Environnement (la moitié des 40 répondants indiquent ne pas connaître cette notion) - se distinguent des entrepôts de données par le caractère dynamique du stockage des données. Ils prennent en charge les données sous leur forme brute, alors que les entrepôts nécessitent au préalable leur formatage strict. Les lacs de données sont donc capables de collecter et stocker facilement des données de tout type, ce qui les rend très utiles pour le traitement des flux de données générés et transmis de manière automatisée par une large gamme d'instruments de mesure. Les lacs de données sont généralement structurés en plusieurs zones, au sein desquelles les données peuvent subir différents traitements auto-

matissables, permettant dans un second temps leur mise en forme pour des usages variés ainsi qu'une analyse en temps quasi réel (notamment par des algorithmes d'apprentissage automatique), par exemple pour générer des alertes lors de la détection d'anomalies.

Concernant les Environnements virtuels de recherche (EVR), parmi les 33 réponses obtenues, un peu plus de la moitié des participants n'en connaît pas l'existence ou n'en utilise pas. Si l'on prend l'exemple de Jupyter (EVR utilisé par certains participants), qui se définit comme un environnement pour le calcul et la production collaborative, le partage et la publication de documents interactifs, on peut estimer que ces environnements adressent un possible nouveau défi, qui est la production directe et quasi automatique de publications dès la fin de l'analyse des données.

L'hétérogénéité des réponses et les discussions durant l'atelier montrent que les verrous à lever en matière de gestion des données de recherche concernent différentes échelles et réseaux d'acteurs, et que plusieurs actions sont nécessaires pour avancer.

## Verrous à lever

### Politique des données à l'échelle de CNRS Écologie & Environnement et de ses laboratoires

À l'issue de cet atelier, nous souhaitons tout d'abord faire remonter à la direction de CNRS Écologie & Environnement le besoin de produire un second document sur la politique des données de l'Institut reprenant les grandes orientations stratégiques en lien avec les enjeux de science ouverte et d'écoresponsabilité des données, étendant ainsi le document existant, limité actuellement à ses dispositifs (Politique des données des dispositifs et infrastructures de CNRS Écologie & Environnement, juillet 2022).

La première recommandation au personnel de CNRS Écologie & Environnement producteur et utilisateur de données/codes est d'ouvrir *a minima* les métadonnées pour l'ensemble des jeux de données et codes diffusables. CNRS Écologie & Environnement pourrait également inciter les personnels à publier autant que possible les jeux de données et codes (sous réserve des conditions d'accès à évaluer au cas par cas) via les dispositifs, IR\* ou entrepôts de données recommandés et clairement listés dans ce document.

La définition des termes employés est cruciale pour éviter les confusions (données, jeux de données, principes FAIR, stockage, sauvegarde, archivage, entrepôt de données, catalogue de données, PGD, EVR, IR...). Ces définitions seraient à annexer dans la politique de données.

#### Lever les amalgames autour des principes FAIR et encourager les personnels à rendre leurs données FAIR, autant que possible

Toutes les données et codes produits par le personnel de CNRS Écologie & Environnement ne sont pas à « FAIRiser ». Un tri et une priorisation des données sont nécessaires. Par exemple, les données et codes en lien avec les publications sont prioritaires, secondairement les données qui remontent dans les dispositifs et IR de CNRS Écologie & Environnement, puis les données d'observation uniques (non reproductibles). On peut aussi partager les requêtes effectuées sur une base de données en ligne ou locale plutôt qu'une base de données dans sa totalité.

Ce choix des données à « FAIRiser » va également dépendre des droits associés : droits de propriété, droits de diffusion... Le point de vue du juriste est ici fondamental (A. Robin, 2022). CNRS Écologie & Environnement peut recommander dans sa politique des données, pour l'ensemble du spectre disciplinaire, l'utilisation de tel ou tel entrepôt de données pour le stockage physique à moyen terme et la diffusion des données, afin d'assurer un niveau minimal de « FAIRisation ». *Data.InDoRES* peut être l'entrepôt par défaut pour les données de recherche en écologie et environnement, si la communauté disciplinaire concernée n'en dispose pas déjà. Pour les codes, CNRS Écologie & Environnement pourrait encourager leur dépôt dans *Software Heritage* ; une étude de faisabilité pourrait être engagée à ce sujet.

#### Améliorer la stratégie d'exposition des données et codes pour CNRS Écologie & Environnement

Pour rendre les données en écologie et environnement les plus visibles et les plus facilement trouvables, CNRS Écologie & Environnement peut réfléchir à une stratégie de catalogage. C'est par une exposition large des métadonnées dans des catalogues consultés fréquemment par les communautés scientifiques et citoyennes que les données sont visibles. Il pourrait promouvoir l'usage du catalogue InDoRES (couplé à l'entrepôt Data.InDoRES, mais aussi ouvert au catalogage d'autres ressources) qui est lui-même « moissonné » par le géocatalogue national, et prochainement Recherche Data Gouv et Data Gouv, sans oublier le catalogue européen d'EOSC\*. Les IR (co)portées par CNRS Écologie & environnement pourraient poursuivre, ou engager selon les cas, ces dynamiques de moissonnage pour maximiser le rayonnement et l'exposition des données cataloguées. Pour les laboratoires utilisant des entrepôts disciplinaires non portés par le CNRS, une réflexion serait à engager pour vérifier la stratégie de catalogage et estimer le niveau de « trouvabilité » des données.



### **La communication à développer sur la Politique des données et l'existence du réseau des correspondants Données OpenDoRES des laboratoires de CNRS Écologie & Environnement**

Le réseau OpenDoRES vise à regrouper un ou plusieurs correspondants Données de chaque laboratoire ayant comme tutelles le CNRS et le MNHN. Créé en septembre 2022, il est coordonné par l'unité BBEES avec pour objectif de sensibiliser et former la communauté aux questions d'ouverture et de gestion des données de recherche (cycle de vie de la donnée, questions juridiques, dépôt dans un entrepôt, licence...). Les missions de ce réseau sont encore peu connues de la communauté de CNRS Écologie & environnement. Les contours des rôles des correspondants ainsi que l'articulation opérationnelle entre chercheurs/correspondants OpenDoRES, dispositifs/infrastructures, IR nationales et internationales thématiques restent à clarifier et à définir pour chaque laboratoire. Le document sur la Politique des données de CNRS Écologie & environnement pourrait permettre ces clarifications.

La mise en œuvre de la politique des données au sein des laboratoires et l'accompagnement dans la « FAIRisation » des données/codes requièrent d'importants moyens humains et financiers, et une synergie avec les autres instituts du CNRS et les autres organismes de recherche dans le cas de laboratoires multitutelles. De nouveaux métiers émergent autour des données, de nouvelles compétences sont à acquérir dans la communauté en écologie et environnement.

### **Propositions d'actions en lien avec la politique des données et la gestion RH de CNRS Écologie & Environnement**

- Missionner un groupe de travail pour compléter la Politique des données des dispositifs et infrastructures et ainsi couvrir tous les types de données produits par la communauté de CNRS Écologie & environnement. L'objectif serait de proposer une trame de politique de données à l'échelle de chaque unité ;
- mettre en place un comité de suivi des opérations pour veiller à la bonne articulation de l'organisation mise en œuvre entre les différents acteurs : chercheurs, correspondants OpenDoRES, dispositifs/infrastructures, IR nationales et internationales thématiques ;

- suivre régulièrement les dispositifs et infrastructures de CNRS Écologie & Environnement dans leur effort d'accompagnement/formation des producteurs de données, le contrôle qualité des métadonnées et la démarche éventuelle de certification ;
- conseiller les unités quant au choix des IR les plus adaptées pour leurs données ;
- soutenir des actions œuvrant dans la création de vocabulaires standardisés pour les données en écologie et en environnement, avec si possible la dimension web sémantique, comme par exemple les travaux en lien avec le GDR SémanDiv (Sémantique de la Biodiversité) pour l'« *Ecological Trait-data standard* » ou AnaEE pour les écosystèmes ;
- soutenir des actions œuvrant dans l'évaluation de la qualité des données diffusées et la complétude des métadonnées ;
- la dimension « e » (économique, écologique et énergivore) est aujourd'hui absente du FAIR alors même que toutes les étapes du cycle de la donnée ont un coût énergétique. Une étude visant à dresser un rapport d'expertise sur cette question pourrait être lancée ;
- missionner un groupe de travail sur la multidisciplinarité/l'interdisciplinarité pour identifier et recommander l'usage d'outils (lacs de données, EVR, autres) facilitant les croisements et les analyses de données pluridisciplinaires ;
- prévoir des profils de postes ouverts au recrutement (ou accompagnement de personnels en réorientation professionnelle) de *data stewards* et autres métiers liés. La formation des correspondants Données est également à soutenir ;
- poursuivre la formation des correspondants OpenDoRES et soutenir des actions de formation de type ANF\* et écoles thématiques communes aux personnels chercheurs et ingénieurs et techniciens producteurs et utilisateurs de données (action inter-instituts/organismes) :
  - planification de la gestion des données (et par conséquent, savoir remplir un PGD) ;
  - documentation des données à l'aide de métadonnées ;
  - apprentissage et intégration de vocabulaires métiers (*thésaurus*, ontologies) ;
  - utilisation de lacs de données ou de EVR.



## Recommandations auprès des unités de CNRS Écologie & Environnement pour encourager la planification de la gestion des données et la « FAIRisation » des données et codes, avec la mise en œuvre autant que possible de mesures écoresponsables

Une recommandation générale est d'encourager chaque unité à identifier un correspondant Données pour participer au réseau OpenDoRES.

### Concernant les personnels producteurs ou gestionnaires de données

Les recommandations ci-dessous sont issues des discussions lors de l'atelier et post-atelier. Elles sont structurées selon les étapes du cycle de vie des données du guide de bonnes pratiques sur la gestion des données de la recherche réalisé par un groupe de travail de la MITI\* (Hadrossek *et al.*, 2023) :

#### Concevoir/Planifier :

- identifier et utiliser les référentiels communs pour les jeux de données à collecter, acquérir ou générer ;
- identifier en amont où stocker/sauvegarder les données d'intérêt et la stratégie de « FAIRisation » et diffusion des données, en lien avec les recommandations de l'Institut et les directives.

#### Réaliser/Collecter :

- pour la collecte des données de terrain le cas échéant, définir une stratégie instrumentale et de stockage/pérennisation cohérente. Se rapprocher du réseau EcoInfo pour étudier leurs recommandations écoresponsables ;
- concernant la gestion raisonnée des échantillons, des données et des codes : trier, ne pas tout stocker et sauvegarder, apprendre à jeter ;
- utiliser des cahiers de laboratoire électroniques par exemple pour saisir des métadonnées dès les phases de collecte/création des données.

#### Réaliser/Traiter et Réaliser/Analyser :

- explorer et si besoin se former sur les nouveaux outils tels que les lacs de données et les EVR.

#### Préserver/Archiver :

- identifier parmi les données triées lesquelles rendre FAIR autant que possible, selon des

niveaux de priorité recommandés par CNRS Écologie & Environnement ;

- sauvegarder les données sélectionnées après tri selon la règle du 3-2-1 (à modérer avec les mesures d'écoresponsabilité) qui signifie de disposer de trois copies des données : stocker ces copies sur deux supports différents et conserver une copie de la sauvegarde hors site.

#### Publier/Diffuser :

- documenter aussi finement que possible les données, au moins celles vouées à être partagées/diffusées, dans un cadre scientifique et en tenant compte des destinataires de la donnée (précision des mesures, volume...) ;
- choisir un entrepôt de « confiance » où publier les données :
  - pour les données reproductibles : partager voire ouvrir les codes associés aux données pour permettre aux utilisateurs de reproduire les données ;
  - pour tout type de données : annexer aux données tout protocole qui explique leur provenance.
- valoriser les données, notamment celles rendues le plus FAIR possible par exemple sous la forme de technical papers pour les codes sources, et de *data papers* pour les jeux de données.

### Concernant les dispositifs et infrastructures de recherche/données de CNRS Écologie & Environnement

- veiller à fournir les outils et méthodes permettant de rendre le plus FAIR possible les données afin de pouvoir le réaliser de façon itérative ;
- encourager les IR à se rapprocher des exigences des entrepôts certifiés CoreTrustSeal et à étudier la faisabilité de candidater à cette certification ;
- les dispositifs et IR pourraient fournir si possible de manière automatisée ou semi-automatisée des éléments alimentant le DMP et la saisie des métadonnées ;

- les dispositifs et IR devraient poursuivre et renforcer la collaboration avec les scientifiques de leur communauté pour maximiser la qualité des données et métadonnées ;
- un système de repérage des doublons pourrait être imaginé ;
- veiller, du point de vue du catalogage, à leur interopérabilité avec les infrastructures thématiques partenaires qu'il reste à clairement identifier ainsi que les futurs catalogues de Recherche Data Gouv et d'EOSC. Doit-on

interroger l'ensemble des dépôts via un seul portail et est-ce utile ? Quelles sont leurs interactions avec la future plateforme intégrée issue du projet GAIA Data ? Chaque IR doit s'interroger sur l'interopérabilité mise en œuvre ou à mettre en œuvre. Une cartographie des interactions entre les différentes IR et dispositifs (co)portés par CNRS Écologie & Environnement serait à faire connaître auprès des directeurs d'unités et leurs correspondants Données via le réseau OpenDoRES.

## RÉFÉRENCES

- Callou, C., Charpentier, I., Clavreul, A., Hénon, A., Joly, D., et al. (2022). Politique des données des dispositifs et infrastructures de l'INEE. HAL, hal-04000652.
- Deuxième Plan national pour la Science Ouverte (2021). Guide de bonnes pratiques sur la gestion des données de la Recherche. v2 2023. Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, p. 32. Disponible sur : <https://www.ouvrirlascience.fr/deuxieme-plan-national-pour-la-science-ouverte/>
- Hadrossek, C., Janik, J., Libes, M., Louvet, V., Quido, M., et al. (2023). Guide de bonnes pratiques sur la gestion des données de la Recherche. v2 2023. HAL, hal-03152732v2.
- Plan national pour la Science Ouverte (2018). Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, p. 12. Disponible sur : <https://www.ouvrirlascience.fr/plan-national-pour-la-science-ouverte>
- Robin, A. (2022). Droit des données de la recherche - Science ouverte, innovation, données publiques. Larcier. HAL, hal-03630680.
- Stratégie nationale des infrastructures de Recherche (2021). Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, p. 270. Disponible sur : <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/la-feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche-2021-84056>
- Wilkinson, M.D. et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3:160018. doi: 10.1038/sdata.2016.18.

# Les défis méthodologiques du **phénotypage haut débit**

Auteurs : Violaine Llaurens (ISYEB), Benjamin Marie (MCAM) et Christophe Salon (Agroécologie INRAE)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Développer les plateformes d'acquisition de données à haut débit utilisables pour une large diversité d'espèces vivantes
- ▶ Former les acteurs de la recherche aux traitements des données brutes, notamment par les méthodes d'apprentissage automatique
- ▶ Favoriser les échanges entre disciplines pour développer le phénotypage intégratif

## Introduction

Les méthodes de séquençage d'ADN ont connu des avancées technologiques majeures durant les dernières décennies, ouvrant l'accès aux génomes complets de multiples organismes, y compris les organismes non modèles. De nombreux développements ont en parallèle été réalisés pour l'analyse de ces grands jeux de données. Cependant, si l'avènement de la génomique a donné lieu à des avancées majeures dans les domaines de la biologie évolutive, la caractérisation à large-échelle des phénotypes des organismes séquencés soulève maintenant des défis méthodologiques et techniques importants. En effet, l'étude des variations des traits reste centrale pour résoudre une grande partie

des questionnements actuels sur l'écologie et l'évolution des espèces, appelant à développer des outils permettant le phénotypage à haut-débit des organismes.

Le but de cet atelier était d'établir l'état des lieux actuel des méthodes, outils, initiatives passées ou en cours concernant le phénotypage à haut-débit ainsi que les perspectives attendues. Au sein de CNRS Écologie & Environnement, les chercheurs et chercheuses étudient un grand nombre d'organismes auxquels sont associés des traits variés, cela implique de nombreux défis méthodologiques pour l'acquisition des données et leurs analyses, mais aussi leur stockage et leur partage.

## État des lieux

### Le phénotypage d'organismes non-modèles

Les questions méthodologiques liées au phénotypage haut-débit intéressent les chercheurs travaillant sur des espèces actuelles comme fossiles, à différentes échelles (des molécules aux communautés) et sur des espèces couvrant largement l'arbre du vivant. Ces questionnements requièrent souvent l'étude de phénotypes très divers, et les méthodes développées sur des organismes modèles ne sont pas forcément adaptées à la grande diversité des organismes étudiés. L'éventail des traits phénotypiques d'intérêt (morpho-anatomie, expression génique, composition chimique, son, comportement, traits de vie et performances...) reste ainsi assez différent selon les espèces étudiées pour leur écologie ou leur évolution.

Dans le domaine du végétal, les approches et les outils de phénotypage à haut-débit sont bien développés pour une diversité d'espèces, concernant les dispositifs de cultures (Jeudy *et al.*, 2016), l'acquisition de données (ex. par imagerie dans différentes longueurs d'onde) ou bien les variables environnementales et leur traitement. Le phénotypage à haut-débit des parties aériennes ou souterraines des plantes est réalisé au sein de plateformes

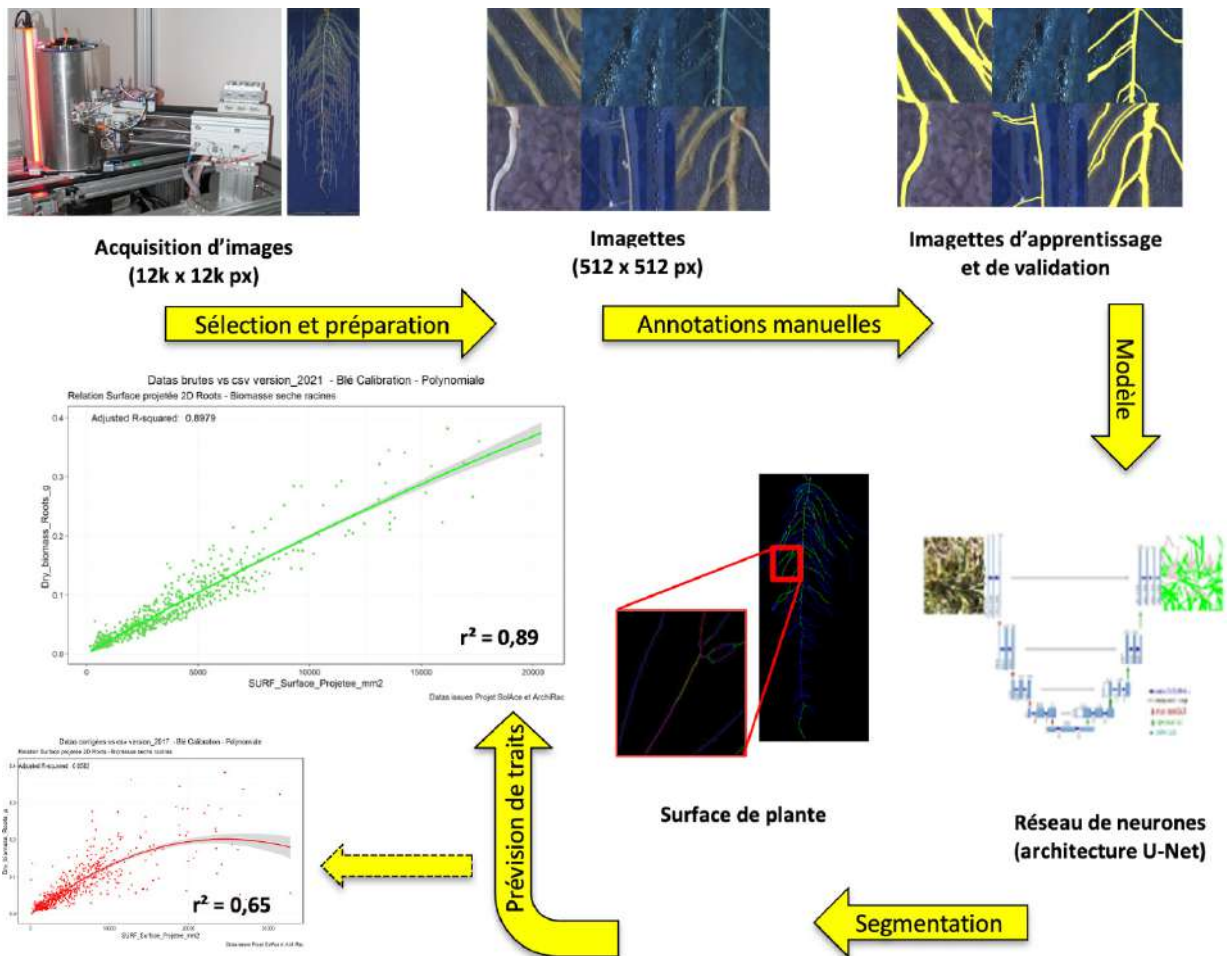
robotisées, en conditions contrôlées ou en conditions naturelles (Atkinson *et al.*, 2019). Ces outils et infrastructures permettent de quantifier des traits phénotypiques morphométriques ou fonctionnels d'espèces dites "modèles" telles qu'*Arabidopsis thaliana* ou *Medicago Truncatula*, ainsi que de plantes des agroécosystèmes (Figure 1). De telles approches sont aussi développées pour des champignons ou animaux à intérêt agronomique, ainsi que pour les modèles classiques utilisés dans la recherche fondamentale en biologie, tels que la souris, la drosophile ou la bactérie.

Il semble cependant peu réaliste de développer des plateformes spécifiques pour chacun des organismes à étudier car l'éventail des traits phénotypiques reste globalement spécifique à ces différents modèles. De plus la compatibilité des modalités de maintien des organismes au laboratoire en vue de l'automatisation de l'acquisition et du traitement de données de phénotypage a aussi été identifiée comme une nécessité qui reste donc conditionnée par les capacités d'acclimatations aux conditions de laboratoire. Ainsi les structures de phénotypage à haut-débit

d'organismes relativement aisés à élever, tels que les bactéries ou les vers nématodes, connaît un certain essor ; cependant ces développements restent limités à une certaine gamme de traits pouvant être aisément abordés chez ces organismes. Par exemple des méthodes de comptage cellulaire ou de détection automatique permettent l'accès à des traits tels que la croissance des populations, d'activité locomotrice ou de comportement.

Dans le but de comprendre les mécanismes impliqués dans l'évolution des traits ou de leur implication dans les interactions écologiques avec d'autres espèces, le phénotypage des traits s'avère ainsi constituer un défi majeur de nos communautés pour les années à venir.

Figure. 1. Canal d'acquisition et d'analyse de données phénotypiques à haut-débit, pour l'étude des phénotypes racinaires de plantes (4PMI INRAE Dijon). Les images acquises par le robot dans la cabine d'imagerie sont coupées en imquettes plus petites qui servent ensuite à l'apprentissage de vérité terrain. Par *deep learning*, la segmentation des images est ainsi fortement améliorée et permet d'obtenir une meilleure précision entre les traits, ici la surface projetée de racines, estimés par le modèle d'après les images (axe X) et ceux mesurés de manière destructive (axe Y).



## Des molécules aux traits d'histoire de vie : des méthodes d'acquisition très diverses avec leurs défis spécifiques

Notre atelier a offert un aperçu de la large gamme de traits étudiés par les différents chercheurs et chercheuses de CNRS Écologie & Environnement : ainsi la notion de phénotypage à « haut-débit » ne concerne pas uniquement le nombre d'individus étudiés et leur variabilité génétique, mais aussi le nombre et la diversité des traits mesurés et la fréquence de mesure de ces traits, ainsi que le traitement des données ainsi générées. Nous avons ici identifié plusieurs catégories de traits et les principaux défis méthodologiques associés, cette liste restant non-exhaustive.

### Traits moléculaires

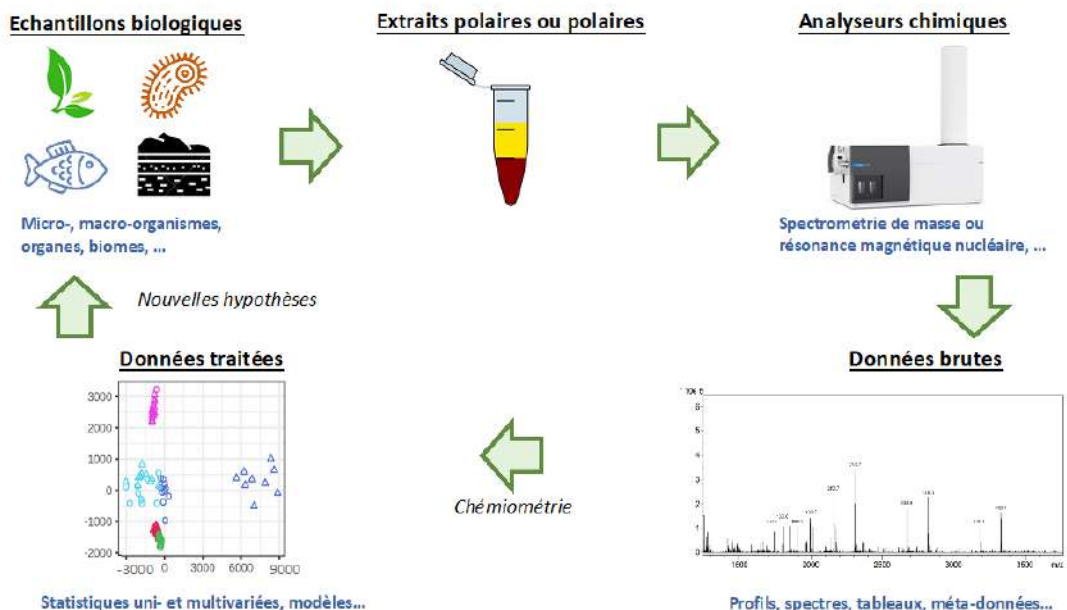
De nombreux traits concernent l'échelle moléculaire : ainsi les patrons d'expression des gènes, mais également les variations des abondances des très diverses familles de composés chimiques qui constituent les organismes (ou mêmes les microbiomes/communautés dans le cas des écosystèmes microbiens) sont fréquemment étudiés. Les analyses globales, ciblées ou non, telles que le permettent les approches de transcriptomique ou de métabolomique, sont à présent maîtrisées par des plateformes spécialisées, permettant d'obtenir des données moléculaires sur des grandes séries d'échantillons (ex. métabolomique - Figure 2). Ces méthodes donnent accès à des

grands jeux de données d'abondances relatives d'une multitude de différents traits chimiques (ex. métabolites primaires ou accessoires, ARN messagers), jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de milliers de traits par analyses.

Des approches globales d'analyses multivariées permettent en premier lieu d'aborder dans leur ensemble la multitude des variations de ces différents traits afin de définir grâce à des approches statistiques dédiées lesquels présentent un intérêt biologique spécifique. Cependant, la caractérisation de la pertinence fonctionnelle de l'ensemble de ces différents traits reste souvent difficile à aborder. La caractérisation des métabolites, par exemple, se heurte à des problématiques spécifiques d'annotation qui reste encore limitée aux molécules les mieux connues. Elle requiert ainsi en parallèle le développement de corpus de données, qui restent trop souvent le fruit d'initiatives spécifiques. Ainsi, ces corpus peuvent être plus ou moins génériques (métabolisme primaire, expression de gènes de ménages) ou spécifiques aux différents organismes et à leurs singularités respectives.

À l'échelle des cellules, leur marquage chimique, ou celui de leur expression génique permet de caractériser plusieurs centaines de génotypes différents, tandis que la plupart du temps, seul un nombre limité de traits peut être mesuré en

Figure 2 : Schéma conceptuel du pipeline analytique de métabolomique décliné aux sciences de l'écologie et de l'environnement.







même temps (une fluorescence révélant l'induction d'un gène, ou une valeur sélective) ce qui rend ces approches plus propices à l'analyse de phénotypes spécifiques.

### Traits morphologiques

Le phénotypage à haut débit de traits morphologiques, déjà largement développé pour les plantes au sein de différentes plateformes (voir supra) est aussi en plein essor pour d'autres modèles biologiques, en particulier grâce à la possibilité de caractériser les variations morphologiques en trois dimensions (Figure 3).

Les nouvelles méthodes d'analyse d'images, dans le domaine du visible, comme dans l'hyper-spectral, permettent également la caractérisation de phénotypes de coloration. Par exemple, l'analyse d'images de motifs de coloration des ailes variables au sein d'une espèce permet de réaliser des associations statistiques entre variations génétiques et phénotypiques (Figure 4).

### Traits sonores

Le développement des enregistrements sonores dans différents environnements, ainsi que de leur traitement automatisé, connaît également un essor important (Figure 5). Ces techniques d'analyse, basées notamment sur le traitement du signal et l'apprentissage automatisé permettent le suivi de communautés naturelles et de mesurer très concrètement, par exemple, l'impact anthropique sur les interactions écologiques entre espèces (Folliot *et al.*, 2022).

### Traits comportementaux

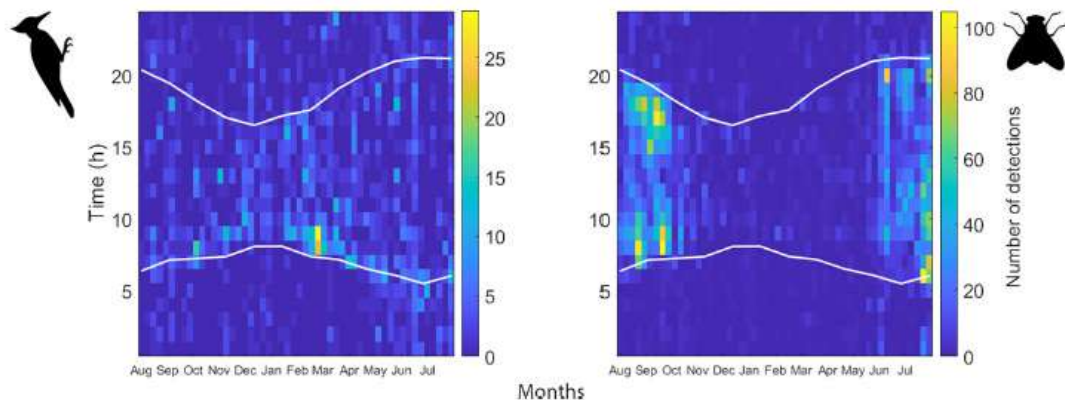
Chez les animaux, la dimension comportementale implique le développement de techniques de phénotypage spécifique. Ainsi le développement de méthodes de suivi automatique basé sur de l'apprentissage automatisé et supervisé (Figure 6) permet d'analyser un grand nombre de séquences vidéo (Mathis *et al.* 2018) et de caractériser le comportement d'un grand nombre d'individus dans des conditions pré-établies. Cependant, la calibration de l'espace dans lequel les animaux sont filmés, ainsi que la nécessité d'acquérir un jeu de données suffisant lors de la phase d'apprentissage, limitent en général le nombre de conditions pouvant être déjà investiguées : on testera ainsi dans un premier lieu le comportement d'individus dans un contexte bien contrôlé (ex. cage expérimentale) avant de pouvoir étendre l'utilisation de ces outils à des conditions plus complexes et fluctuantes.

Des développements spécifiques d'identification individuel permettent également d'étudier le comportement de certains animaux *in natura*. Ainsi, la méthode développée par Ferreira *et al.* (2020) permet, quant à elle, de quantifier chez les oiseaux le nombre de visites de chaque individu d'une population vers son nid ainsi que vers différentes sources de nourritures.

### Traits d'histoire de vie

Une dernière gamme de traits, les traits d'histoire de vie, apparaît très pertinente dans le cadre des recherches menées au sein de CNRS Écologie &

Figure 5. Variations annuelles et journalières dans l'activité des pics-vert et des insectes pollinisateurs au sein d'une forêt alpine, mesurées par la détection des sons de type « martèlement » (panneau de gauche) et « bourdonnement » (panneau de droite) par apprentissage automatisé. La gamme de couleurs indique l'intensité des interactions estimée par le modèle (Folliot *et al.* 2022).



Environnement. En effet, les traits d'histoire de vie (tels que le temps de développement, la longévité, l'investissement reproducteur) ont généralement des effets directs sur la valeur sélective des individus suscitant ainsi l'intérêt des chercheurs abordant les questions évolutives et les interactions avec les conditions environnementales, qu'elles soient biotiques (compétition, prédation, mutualisme) ou abiotiques (effet du changement climatique par exemple).

### Contrôle du stade développemental

Pour permettre des comparaisons pertinentes entre individus ou entre espèces, le phénotypage haut-débit implique de pouvoir caractériser ou contrôler de manière fine le stade développemental auquel le trait est mesuré. Ceci est d'autant plus difficile lorsque que la fenêtre temporelle au cours de laquelle le trait comportemental peut être mesuré est courte. Pour des questions liées à la biologie du développement notamment, le phénotypage haut-débit peut également nécessiter des mesures de traits répétées au cours du développement des différents individus étudiés.

### Contrôle des conditions environnementales

Enfin, les phénotypes mesurés dépendent fortement des conditions environnementales dans lesquelles les individus se développent et sont observés (plasticité phénotypique). Ainsi, une approche haut-débit peut également impliquer la mesure d'un même trait dans plusieurs expériences avec des conditions environnementales similaires pour tous les essais ou, bien au contraire, en faisant varier les conditions environnementales pour obtenir des courbes de réponses des traits phénotypiques. La précision de mesure et de contrôle des paramètres environnementaux est ainsi un élément clef afin de parvenir à une comparaison non biaisée des variations phénotypiques entre espèces. Certaines plateformes sur lesquelles CNRS Écologie & Environnement joue un rôle majeur, telles que la station expérimentale de Moulis ou l'écotron de Foljuif, permettent des élevages en conditions contrôlées d'organismes terrestres ou aquatiques et ouvrent de nombreuses possibilités sur le phénotypage d'un grand nombre d'organismes, placés dans des conditions environnementales variées.

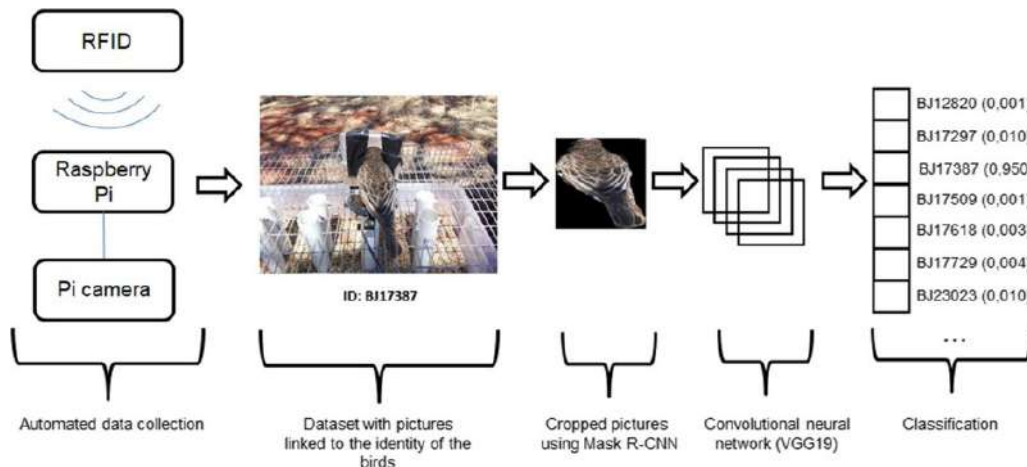


Figure 6. Aperçu de la façon dont des oiseaux visitant une mangeoire peuvent être identifiés individuellement grâce à un algorithme d'analyse d'image, basé sur de l'apprentissage automatisé (Ferreira et al., 2020).

## Questions futures et verrous à lever

### Défis techniques liés aux grands jeux de données phénotypiques

Le phénotypage à haut-débit engendre de très grands jeux de données, posant tout d'abord le problème de leur stockage et de leur transfert. Ce problème est d'autant plus important que si des bases de données internationales de réf-

érence existent et sont bien établies, pour l'ensemble de la communauté, en ce qui concerne les données de génomique ou de transcriptomique (*National Center for Biotechnology Information, European Nucleotide Archive*), la nature

beaucoup plus hétérogène des données de phénotypage et la diversité des communautés qui les génèrent et les utilisent, limitent pour le moment la mise en place de grandes bases de données de phénotypage à large échelle et nous questionnent quant aux capacités de stockage et de bancarisation de ces données au sein des unités de recherche de CNRS Écologie & Environnement (voir aussi Atelier « Données, après l'acquisition »). Il existe en revanche des bases de données phénotypiques centrées sur des organismes modèles, telles que *Flybase*, qui permettent de rassembler des données de phénotypes divers, obtenues sur les drosophiles. D'autres bases de données génétiques, comme *barcode of life* (BOLD), donnent accès non seulement à des séquences génétiques permettant l'identification des espèces mais aussi à des photos pouvant permettre des études sur la morphologie.

### **Ontologie des phénotypes**

La comparaison entre espèces, mêmes proches, ainsi que l'intégration de traits mesurés à différentes échelles sur les mêmes individus requièrent de définir précisément les traits mesurés, ainsi que les techniques d'acquisition. Ainsi, même pour des traits simples, tels que la taille corporelle chez les animaux ou la hauteur pour une plante, la définition d'un cadre commun s'avère nécessaire pour répondre à certaines questions d'écologie et évolution. On pourra également utiliser des critères développementaux ou fonctionnels selon les questions abordées.

Certains traits plus complexes, tels que la composition génétique des communautés de micro-organismes qui constituent un microbiote, sont de plus en plus perçus comme de véritables phénotypes spécifiques à l'hôte ou à l'écosystème qui les abritent ; mais ces utilisations font encore débat au sein même des différentes communautés scientifiques qui les étudient.

L'atelier a ainsi mis en évidence la diversité du vocabulaire employé dans les différentes communautés scientifiques et l'intérêt des échanges entre disciplines pour la caractérisation de phénotypes intéressants différentes équipes travaillant sur des questions distinctes. Ainsi, la notion de « biomarqueur » pourra correspondre à un métabolite bien défini jouant un rôle biologique potentiel pour un spécialiste de l'écologie chimique, alors qu'un écologiste

pourra aborder une signature chimique même imparfaitement caractérisée comme bio-indicatrice d'un phénomène particulier, dès lors qu'il puisse rationnellement montrer que ce signal soit biologiquement discriminant.

### **Défis techniques rencontrés lors du traitement des données brutes**

L'atelier a permis de mettre en évidence que le traitement des données phénotypiques requiert fréquemment des développements de méthodes bioinformatiques spécialisées. À titre d'exemple, des progrès des bases de données de références d'écologie chimique nous invite à ré-interroger les données brutes précédemment acquises bien que ces dernières soient très volumineuses et de nature hétérogène (car dépendant du fabricant de l'analyseur utilisé) et donc peu compatibles avec les plateformes déjà existantes (et utilisant des formats compressés), nécessitant ainsi le développement de solutions adaptées et dimensionnées en fonction de ces seules contraintes. De la même manière, l'application de méthodes d'apprentissage profond pour l'acquisition de données comportementales nécessite des compétences en codage et en manipulation de grands jeux de données, soulignant le besoin de formation dans ces domaines. D'autre part, les chercheurs et chercheuses participant à l'atelier ont souligné l'intérêt des échanges sur ces défis entre équipes ou entre laboratoires s'intéressant soit à des traits similaires, mais sur des organismes différents (acquisition de données sur le vol chez les insectes ou les oiseaux), ou à des traits de nature très différente sur des organismes similaires, où le partage d'expérience sur les conditions d'élevage et de réalisation des expérimentations au laboratoire peut avoir un fort impact sur l'acquisition et le traitement des données.

### **Défis analytiques et statistiques multivariées**

La majorité des échanges de l'atelier a notamment porté sur le développement des méthodes d'analyses des données multivariées. Pour certains traits, comme ceux mesurés en morphologie, des méthodes spécifiques, comme la morphométrie géométrique, ont été largement développées et il existe une communauté de chercheurs et de chercheuses actifs et actives, échangeant réguliè-

rement sur les aspects techniques comme scientifiques, notamment à travers les Symposium de Morphométrie et d'Évolution des Formes. Notons par ailleurs que le développement de la chimio-métrie en France a pu grandement bénéficier de l'essor de la société française de chimio-métrie qui a déjà ainsi alimenté les travaux menés dans de nombreux domaines (médical, industrie...) auxquels ceux des sciences de l'écologie et de l'évolution se sont jointes plus récemment. En revanche, pour d'autres traits, dont l'acquisition a été facilitée par des avancées technologiques plus récentes, les méthodes d'analyses restent encore assez limitées. L'application des méthodes de statistiques multivariées sur des jeux de données où les variables ne sont pas indépendantes et ont des échelles drastiquement différentes introduit des biais, au même titre que les biais liés aux échantillons choisis, au nombre de réplicats ainsi qu'aux conditions d'acquisition. Certaines solutions d'analyses multiblocs dernièrement développées tendent à permettre l'essor de ces approches

complexes et une communauté dynamique de statisticiens, développeurs et utilisateurs avertis s'est constituée pour assurer des formations pratiques sous forme d'ateliers d'accompagnement du traitement des jeux de données des utilisateurs (ex. *package mixomics* sous R).

D'autre part, l'étude de certains phénotypes demandant des compétences très spécialisées, par exemple en chimie pour les données métabolomiques, l'intégration de phénotypes variés dans des approches intégratives, soulignent le besoin de collaboration entre équipes, depuis l'élaboration initiale du projet jusqu'à son aboutissement et sa valorisation.

Les chercheurs et chercheuses de l'atelier ont ainsi montré un grand intérêt pour la mise en commun des méthodologies et résultats obtenus dans le cadre d'études de phénotypage à haut-débit, à travers par exemple la mise en place de séminaires réguliers qui pourraient entre autres être soutenus par un RT spécifique.

### Défis scientifiques : intégration phénotypique

Tout comme pour la génomique, l'ouverture de nouvelles possibilités de phénotypage, permise par les innovations technologiques récentes, permet d'envisager des études exploratoires à la recherche, par exemple, de nouvelles molécules. Cela étant, les études impliquant le phénotypage à haut-débit permettront également de répondre à des questions fondamentales telles que la

coévolution entre morphologie et comportement ou entre espèces mutualistes. De telles études nécessiteront une synergie entre différentes équipes de recherches travaillant sur des phénotypes très différents, dont l'acquisition repose sur des techniques présentant des difficultés et contraintes spécifiques, ainsi que sur des organismes très divers.

## RÉFÉRENCES

- Ferreira, A. C., Silva, L. R., Renna, F., Brandl, H. B., Renault, J. P., Farine, D. R., ... & Doutrelant, C. (2020). Deep learning based methods for individual recognition in small birds. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(9), 1072-1085.
- Jay, P., Leroy, M., Le Poul, Y., Whibley, A., Arias, M., Chouteau, M., & Joron, M. (2022). Association mapping of colour variation in a butterfly provides evidence that a supergene locks together a cluster of adaptive loci. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1856), 20210193.
- Folliot, A., Hauptert, S., Ducrettet, M., Sèbe, F., & Sueur, J. (2022). Using acoustics and artificial intelligence to monitor pollination by insects and tree use by woodpeckers. *Science of the Total Environment*, 838, 155883.
- Mathis, A., Mamidanna, P., Cury, K. M., Abe, T., Murthy, V. N., Mathis, M. W., & Bethge, M. (2018). DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning. *Nature neuroscience*, 21(9), 1281-1289.
- Varón-González, C., Fraimout, A., Delapré, A., Debat, V., & Cornette, R. (2020). Limited thermal plasticity and geographical divergence in the ovipositor of *Drosophila suzukii*. *Royal Society open science*, 7(1), 191577.





Photographie prise lors de la Conférence des Nations unies sur la biodiversité (COP15) qui a eu lieu en décembre 2022 à Montréal, Canada, et qui s'est terminée par un accord historique destiné à guider l'action mondiale en faveur de la nature jusqu'en 2030.  
Crédit : Eudora Berniolles /CNRS Écologie & environnement



**sciences**  
& **société**  
du savoir  
à l'action

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023

# Approche globale des **éthiques** dans les relations sociétés/nature

Auteurs : Rémi Beau (iEES Paris), Catherine Aubertin (PALOC)

Contributeurs : Annabelle Aish (MNHN), Anne Atlan (ESO), Sébastien Barot (iEES), Olivier Barrière (ESPACE-DEV), Nadia Belaïdi (MNHN), François Criscuolo (IPHC), Claire Damesin (ESE), Vincent Daubin (LBBE), Julien Dellaux (MNHN), Frédéric Ducarme (CESCO), Juan Fernandez-Manjarres (ESE), Renata Freitas Machado (PALOC), Jessica Garcia de Silveira (LAB-CITE), Thibault Genissel (CESCO), Sylvie Guillaume (GEODE), Jane Lecomte (ESE), Hélène Melin (CLERSÉ), Marie Pelé (ETHICS), Florence Pinton (SAD-APT), Sylvie Pouteau (SAD-APT), Bernard Reber (CEVIPOF), François Sarrazin (CESCO), Cédric Sueur (IPHC), Eric Tannier (INRIA). Nous remercions Sylvie Guillaume pour son aide dans le travail de cadrage de l'atelier et Frédéric Ducarme et Nadia Belaïdi pour leur implication dans l'animation de l'atelier.

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ **Accroître la réflexivité sur les pratiques de recherche dans les laboratoires dans une démarche collective, ce qui exige du temps et des espaces de délibération dédiés**
- ▶ **Utiliser les éthiques environnementales non pas au service de la résolution de conflits entre les humains et la nature, mais comme des aiguillons critiques pour réexaminer les pratiques sous un angle moins anthropocentré et plus sensible aux enjeux de justice sociale et écologique**
- ▶ **Repenser l'arbitrage entre protection de la nature et protection des humains dans une démarche plus inclusive**

## Introduction

La communauté scientifique doit prendre acte du constat : en matière environnementale, la science avance et la biodiversité continue à décliner. Les chercheuses et les chercheurs engagés pour la défense de l'environnement estiment que les décisions politiques et les négociations internationales ne tiennent pas compte de leurs alertes.

L'extension de l'emprise humaine sur les terres et les océans, la manipulation du vivant et son appropriation, les limites de l'humain (transhumanisme et intelligence artificielle) engendrent de fortes inquiétudes. Notre atelier a révélé que la sensibilité et les attachements de chacun s'opposent à une recherche qui s'éloigne de plus en plus des expériences vécues de la nature. Ces phénomènes intensifient les questions épistémologiques, éthiques et politiques au cœur des rapports entre science, nature et société (Jasanoff, 2004).

Plusieurs axes de questionnement peuvent être suivis. Se pose, en premier lieu, la question du sens de la recherche et la nécessité de quitter les laboratoires pour s'ouvrir à la société. Les sciences participatives et citoyennes répondent partiellement à ce besoin d'agir. D'autres formes d'action, comme les pratiques de désobéissance civile (*Scientist rebellion*), interrogent les frontières entre science et militantisme.

Dans ce contexte qui met au premier plan la question de la responsabilité des scientifiques, l'éthique de la recherche a fait l'objet d'une attention accrue ces dernières années au sein des établissements scientifiques. Cela donne lieu à un ensemble de programmes et de formations destinés aux enseignantes et enseignants, chercheuses et chercheurs, et étudiantes et étudiants. Mais les thématiques au cœur de la réflexion restent principalement celles de l'intégrité scientifique et de la déontologie des chercheuses et chercheurs. Il s'agit donc avant tout de répondre à des problématiques liées à des cas de falsification, de plagiat ou de conflit en les abordant sous un angle procédural. Très récemment, cette réflexion sur la déontologie des chercheurs s'est en outre étendue à la question de l'impact écologique de la recherche.

Or, cette dimension procédurale n'épuise pas la totalité et la diversité des questions éthiques qui se posent au sein d'un laboratoire scientifique. Plus que le devoir de ne pas « tricher » ou de ne pas déroger à la déontologie scientifique, la traduction de la visée éthique peut conduire les chercheur.es à s'interroger sur les implications sociétales de leurs recherches. Des questions peuvent ainsi apparaître au sujet des options technologiques promues par des programmes de recherche, à propos du modèle économique dans lequel une « innovation » s'insère, ou encore de la prise en compte ou non de la dimension culturelle ou sociale dans l'application de certains résultats scientifiques. Un autre ensemble de problèmes se pose aux chercheur.es dans le cadre des processus de production des connaissances. Qu'il s'agisse d'expérimentations animales, d'expériences conduites en dehors des laboratoires, de rapports de pouvoir au sein de la communauté scientifique, de contrats avec le privé..., ces problèmes éthiques prennent forme dans les pratiques de recherche elles-mêmes.

De plus, s'il apparaît clairement que les pratiques de recherche soulèvent une diversité de questions éthiques, la modalité de leur prise en charge reste à définir. Qui est appelé à mener le travail éthique au sein des laboratoires ? Quelles compétences mobiliser ? Ce travail peut-il être externalisé, en s'en remettant par exemple à des comités d'éthique *ad hoc* ? Ne s'agit-il pas plutôt ou aussi de mobiliser les scientifiques pour développer une réflexivité immanente aux équipes de recherche ?

Un deuxième axe de questionnement conduit à examiner les transformations des rapports entre les humains et les autres espèces impliquées par la dynamique anthropocène (Bonneuil & Fressoz, 2013). La globalisation des enjeux environnementaux et leur inscription dans des temporalités longues soulèvent des « problèmes pernicieux » (*wicked problems*). Par exemple, quelle part réservée à l'épanouissement de la vie non humaine sur terre ? Comment garantir un plancher social à l'ensemble de l'humanité sans dépasser les frontières planétaires ? De telles questions invitent à la prospective et à la construction d'une pluralité d'horizons possibles ou désirables.

Un troisième axe, enfin, oriente la réflexion vers la prise en compte de la conflictualité inhérente aux questions environnementales. Le « global » tend à homogénéiser les sociétés, les cultures et les groupes sociaux. « Responsabilité commune, mais différenciée » était pourtant l'un des principes cardinaux issus du Sommet de la Terre de Rio en 1992. La construction d'un monde commun soutenable apparaît comme une boussole dans la réflexion sur l'adaptation aux changements globaux, mais son alignement avec la résistance au processus d'homogénéisation

bioculturelle doit être examiné. Les approches éthiques au niveau global ne doivent pas évacuer les conflits de mondes, d'usages et de valeurs. Partant des contributions proposées par des chercheur-se-s qui ont rencontré des questions éthiques dans le cadre de leurs activités scientifiques, notre réflexion collective visera à identifier les enjeux les plus saillants d'une époque marquée par les changements environnementaux globaux et à décrire les leviers et les obstacles méthodologiques et théoriques associés à leur prise en charge.

## État de l'art

Les échanges au sein de notre atelier ont ainsi distingué trois grands axes : la responsabilité des chercheurs, les manières d'habiter la Terre, les conflits de mondes.

### Responsabilité et intégrité des scientifiques

#### Rapports sciences/société

Les rapports sciences/société sont depuis leur origine au cœur du développement des recherches sur les questions environnementales. Le rôle de la recherche est doublement questionné : d'une part sous l'angle de sa contribution potentielle aux dommages environnementaux (en particulier les technosciences) et, d'autre part, sous celui des solutions qu'elle pourrait apporter à certains de ces problèmes. Depuis les années 1970, une critique des sciences s'est faite entendre questionnant leurs rapports avec la sphère politique. L'accélération des bouleversements environnementaux aiguise cette critique sur deux faces. D'un côté, elle pose la question des moyens mis en œuvre pour produire la connaissance (déplacements, équipements, production et stockage de données, puissance de calcul pour les analyses). De l'autre, elle invite à examiner les modèles socio-économiques et les nouvelles technologies dans lesquels s'insèrent les résultats de recherche. Dans un contexte où les injonctions à trouver des réponses, des

innovations ou des solutions face aux changements globaux se multiplient, les chercheur-se-s se trouvent confrontés à des questions portant à la fois sur leur responsabilité, sur la légitimité éthique de leur recherche, ou encore sur la façon dont ils accordent une légitimité, ou non, à la pluralité des savoirs. Parallèlement, la recherche est en interaction avec des stratégies industrielles et politiques qui instrumentalisent le scepticisme propre à la démarche scientifique pour jeter le doute sur les consensus établis par les communautés de chercheuses et chercheurs.

#### Éthique procédurale

Face à ces questions, différents types d'actions sont menés. Plusieurs réponses institutionnelles ont été apportées en développant une approche procédurale de ces enjeux éthiques. Les comités d'éthique ont été multipliés. Ils veillent d'abord à protéger les conditions de la recherche et la réputation des institutions : respect des normes, consentement des enquêtés, règlement des conflits entre chercheurs, voire acceptabilité

sociale de l'innovation... Des référents « déontologues-lanceurs d'alerte », « médiateurs », « intégrité de la recherche » sont nommés au sein des institutions de recherche. Ils s'inquiètent des constats de plagiat liés à la mondialisation des publications et à la doctrine *publish or perish*, sans nécessairement remettre directement en cause le business de l'édition qui impose de plus en plus que les chercheurs achètent le droit de publier leurs travaux. Ces comités spécialisés peuvent parfois paraître déconnectés des défis environnementaux.

D'autres initiatives ont vu le jour, notamment sous l'impulsion de collectifs de chercheurs. Ils dénoncent la bureaucratisation de la recherche. Ainsi, l'initiative des labos 1point5 tente de remettre en cause le paradigme de la croissance. Une comptabilité des émissions de carbone dues aux activités de recherche se met en place et définit des budgets carbone : priorisation des vols pour assister à des colloques, recyclage des équipements... Ainsi, les procédures du protocole de Nagoya sur l'accès aux ressources génétiques et aux savoirs associés rivalisent de complexité.

## Les manières d'habiter la Terre

### Partage de la Terre

Jusqu'où l'espèce humaine peut-elle étendre son contrôle, domestiquer les espèces et artificialiser les écosystèmes à son profit ? Une des cibles du cadre mondial de la biodiversité discutée à la COP15 (CDB\*) vise à protéger 30 % des terres et des mers. On peut s'interroger sur la viabilité de ces espaces protégés dans un monde qui poursuivrait une croissance économique fondée sur la surexploitation des ressources sur les 70 % restants. Ce débat s'étend au futur de l'agriculture, aux projets à défendre (quels systèmes de production entre agroécologie et agriculture industrielle, *land sparing/land sharing*) et aux enjeux d'appropriation du foncier. Quelle place accorder aux peuples autochtones et aux communautés locales pour implanter et gérer ces aires protégées ? Il n'y a pas d'éthique environnementale sans éthique agricole et alimentaire. On ne peut penser l'une sans l'autre.

### Cohabitation et coévolution humains non-humains

Il s'agit ici de penser la coviabilité des systèmes humains et non-humains. Les éthiques environnementales (Leopold, 1949) ont récemment élargi leur champ en replaçant la question écologique dans le contexte plus large de l'évolution (approche écocentrée), considérant que la dynamique anthropocène, outre les « simples » disparitions d'espèces qu'elle entraîne (Van Dooren, 2014), constitue aussi une énorme pression de sélection et donc d'évolution sur les espèces persistantes. Cette ouverture

conduit les réflexions à se situer à l'échelle des processus micro et macro-évolutifs et de leurs interactions avec les activités humaines (Sarrazin & Lecomte, 2021). Dans le cadre des enjeux de cohabitation humains/non-humains, de nouvelles propositions conceptuelles et pratiques émergent autour de la notion de réensauvagement et de partage de l'espace entre humains et nature sauvage (Maris, 2018).

La pandémie de Covid, en soulignant les liens entre santé humaine et celle des écosystèmes, s'inscrit dans cette problématique. Le concept *One Health* (une seule santé) rappelle ainsi que la santé des humains, des autres espèces vivantes et des écosystèmes sont interdépendantes aux échelles locale, nationale et planétaire. Nous encourageons toutefois une certaine vigilance sur le potentiel anthropocentrisme de l'élaboration et de la mise-en-œuvre du concept *One Health*.

Par ailleurs, la multiplicité des nouvelles technologies utilisées pour collecter des données sur la biodiversité interroge le caractère éthique de l'utilisation de plus en plus fréquente de capteurs, GPS, pièges photographiques ou drones pour observer la faune et les écosystèmes, mais qui de fait observent aussi les humains à leur insu et sans leur consentement.

### Émergence de nouvelles individualités

Avec l'accélération des connaissances sur le vivant, on se demande quelles sont les frontières de l'humain quand on le sait inscrit dans les dynamiques biologiques et une coévolution avec



des microorganismes qui font partie de nous et qui ont permis l'habitabilité de la planète (Haraway, 2016 ; Tsing, 2017). Ce qui était conçu comme séparé, environnant, doit maintenant être réintégré dans une vision beaucoup plus complexe des milieux tant tous les vivants sont inter-

dépendants (Fernandez-Manjarrés *et al.*, 2018 ; Takeushi *et al.*, 2014). Il s'agit de reconsidérer le pouvoir d'agir des animaux, des plantes et des microorganismes, bouleversés par la production industrielle et le recours aux intrants chimiques (Latour, 2017 ; 2021).

## **Conflits de mondes, d'usages et de valeurs**

### **Décolonisation de la recherche**

Pour ceux travaillant dans les pays du Sud, la critique du monde occidental et du paradigme industriel libéral s'est imposée jusqu'à revendiquer aujourd'hui une décolonisation de la recherche qui permettrait d'écouter d'autres récits, de comprendre d'autres manières d'habiter la planète (Ferdinand, 2019). Les pays du Sud, les peuples autochtones et les communautés locales s'imposent sur la scène internationale. Ils dénoncent les inégalités de développement dues à l'exploitation coloniale qui perdure. Cette critique s'est étendue et les chercheurs s'interrogent sur leur propre colonisation par un seul récit réducteur, sur leurs pratiques et l'utilisation de la science au service de modes de vie destructeurs de la planète (Fressoz & Locher, 2020). Par-delà les postures et les polémiques, cette thématique soulève des questions épistémologiques difficiles sur la commensurabilité des systèmes de savoirs.

### **Usages et représentations**

Dans les espaces naturels, la protection de l'environnement et la défense des animaux et des plantes se rejoignent lorsqu'il s'agit de considérer les espèces endémiques ou indigènes, mais entrent en opposition pour les espèces introduites, qui constituent une menace pour la biodiversité indigène. L'objectif de protection de l'environnement, qui implique de contrôler, voire d'éradiquer ces prédateurs, rongeurs et ravageurs, se heurte alors au principe de respect de la vie animale, particulièrement lorsqu'il s'agit d'espèces sensibles et charismatiques comme les mammifères (Wandesforde-Smith *et al.*, 2021). Les conflits d'usage qui opposent les acteurs d'un territoire s'ancrent fréquemment dans des divergences de représentations. Ainsi les espèces transplantées pour l'adaptation au changement climatique

peuvent être vues comme les futurs piliers de la biodiversité. Ce sont des conflits de mondes où s'affrontent les conceptions du sauvage et du domestique, de la ville et de la campagne, de l'ordinaire et du remarquable, du proche et du lointain. Cette pluralité reflète la diversité des regards qui se posent sur un espace ou une espèce : profanes ou savants, du dedans ou du dehors, d'un groupe social ou d'un autre, d'une culture ou d'une autre. La réflexion éthique sur l'environnement est confrontée à cette pluralité des conceptions du monde dont elle doit tenir compte sous peine de créer des situations d'injustice épistémique.

### **Droits de la nature**

Parallèlement, repenser le droit de la nature invite à discuter le rapport asymétrique entre l'Humain et la Nature, tel qu'inscrit dans le droit formel français/code de l'environnement, en tant que situation morale (Le Roy, 1999). Dans un dialogue critique avec le droit de l'environnement existant, la reconnaissance des droits de la Nature et de certains de ses éléments comme sujets de droit accompagne l'évolution de l'éthique environnementale, évolution qui tend à élargir le cercle des détenteurs de droits et à tenir compte de la pluralité des ontologies (Descola, 2005). Cette évolution ne s'est pas faite spontanément, elle a résulté de luttes âprement menées par des collectifs. Ces réflexions et ces actions se déploient à plusieurs échelles, du local (rivières, bassins versants) au national (ex. Constitutions de la Suisse et de l'Équateur). Les océans et le plancton sont également étudiés comme possibles titulaires de droits – tout en posant la question de la représentation adéquate de ces entités.

## Questions futures

### Éthique et politique de la recherche

Construire des guides et comités d'éthique peut s'avérer utile pour traiter des questions vives au sein des laboratoires. Mais cela reste insuffisant pour deux raisons. En premier lieu, ces approches tendent à réduire l'éthique à une simple procédure administrative, limitant l'implication des chercheurs. Elles peuvent avoir pour conséquence un certain désengagement des chercheurs de la réflexion sur leurs responsabilités individuelles et collectives. Elles ne prennent pas en compte la nécessité d'instruire des recherches sur des questions en évolution constante et donc d'ouvrir les laboratoires à des travaux de recherche éthique. Ensuite, elles ne remontent pas aux sources des principaux problèmes qui ont trait non seulement à l'éthique, mais également aux politiques de recherche. Financement, participation des entreprises, évaluation des chercheurs et des unités, organisation des laboratoires, toutes ces questions forment l'amont de phénomènes qui ne peuvent être traités seulement en aval.

Ces deux limites ouvrent les questions suivantes : comment éviter la bureaucratisation de l'éthique et ne pas reléguer les attachements, la sensibilité et la diversité relationnelle des situations au second plan ? Quelles structures mettre en place dans les laboratoires pour faire place à la délibération collective et à la recherche sur ces questions éthiques ? Quelles évolutions dans les pratiques d'évaluation des chercheurs pour favoriser les démarches éthiques ? Comment protéger les lanceurs d'alerte au sein des laboratoires ?

### Ethique, valeurs et pratiques

Le développement des éthiques environnementales a donné lieu à une spécialisation croissante entre différents sous-domaines de l'éthique : éthique animale, éthique végétale, éthique de la nature sauvage... De nombreuses typologies ont été dressées différenciant les postures et les théories morales (écocentrisme, biocentrisme, pathocentrisme...). Ces idéaux-types sont utiles et fréquemment ré-appropriés par les chercheurs en dehors du seul champ disciplinaire de l'éthique environnementale.

Néanmoins, ils restent parfois trop éloignés de la réalité des positionnements des acteurs en présence et des dynamiques sociales dans lesquelles se forment les valeurs et les choix. L'interdépendance des crises environnementales, sociales, économiques, politiques et l'essor des sciences citoyennes ou collaboratives, poussent à toujours plus d'interdisciplinarité et d'ouverture de la science à la société, ce qui est contraire à l'organisation en silo des disciplines scientifiques. Il s'agit d'ouvrir les différentes disciplines à la réflexion éthique et au dialogue avec l'ensemble des disciplines, notamment les sciences écologiques, les sciences de l'évolution, les sciences de la conservation et les sciences humaines et sociales, afin d'étudier plus finement la formation des jugements de valeur au sein des différents groupes sociaux et culturels (Ingold, 1993). Comment porter la parole éthique au sein des laboratoires et la rendre audible pour la société ?

### Relations interspécifiques

La réflexion sur les enjeux éthiques qui ne relèvent pas des seules relations inter-humaines a connu un développement sans précédent dans les dernières décennies (Larrère et Larrère, 1997). Le champ éthique s'est vu peuplé peu à peu de nouvelles figures animales, végétales ou encore abiotiques, dont le statut moral restait à définir. Cette question émane de différentes sources et disciplines, notamment la philosophie, dans une collaboration avec le droit et les sciences politiques (Pelluchon, 2021). La littérature sur l'éthique et le droit des animaux s'est considérablement étoffée, se traduisant parfois par des avancées juridiques (Le Bot, 2021). À un stade plus exploratoire encore, le domaine du végétal a donné prise au cours des deux dernières décennies à de nouveaux questionnements éthiques. Ces recherches novatrices qui enrichissent la compréhension des relations interspécifiques doivent sans aucun doute être poursuivies. Toutefois, un décalage peut se créer entre les approches des sciences humaines et sociales et celle des sciences du vivant lorsqu'il s'agit de décrire les activités et les caractéris-

tiques des êtres vivants (Selosse, 2021). On peut penser à la question de l'« intelligence des plantes » ou à celle de la communication chez les végétaux qui ne font pas consensus même au sein des sciences du vivant, ou encore aux enjeux liés à la bioinspiration. Comment replacer les humains parmi les autres vivants et intégrer ces derniers aux décisions les concernant ? Comment mener une démarche inclusive vis-à-vis des autres qu'humains ? À l'inverse : comment arbitrer entre protection de la nature et protection des humains ?

### Quelle justice ?

Les réflexions sur l'éthique et le droit rejoignent de différentes manières l'idée de justice sous deux dimensions. La première est celle de la justice sociale. Elle peut s'entendre comme un principe politique et moral qui a pour objectif une distribution juste et équitable des richesses, qu'elles soient matérielles ou symboliques, entre

les différents membres de la société. À cet aspect distributif s'ajoutent des enjeux de reconnaissance et d'égalité dans la participation aux processus de décision. Cette dimension peut inclure un versant environnemental par l'intégration de la distribution des avantages et désavantages procurés aux humains par l'environnement et des décisions politiques relatives à des questions écologiques. Cela renvoie au domaine de la justice environnementale.

La seconde dimension relève de la justice écologique. Celle-ci vise le rééquilibrage des relations entre les humains entre eux et entre les humains et les autres qu'humains. La reconnaissance de cette diversité de dimensions de la justice pose la question de l'arbitrage entre les différentes obligations qu'elles définissent respectivement. Comment articuler les justices sociale et écologique, ou environnementale ? Quelle peut-être la place de la sphère éthique dans la prise de décision (exemple de la Convention citoyenne pour le climat) ?

## Verrous

L'inventivité liée à la référence aux éthiques environnementales ne pourra se traduire effectivement dans la réalité qu'à la condition de lever les verrous existants dans les systèmes économiques (paradigme industriel et de croissance, solutionnisme technologique, rapports de production invisibilisés, asymétrie des relations et processus de décision), et juridiques (règles du marché, accords commerciaux, conception des instruments dans le langage du droit continental) qui contrecarrent la prise en compte des enjeux écologiques (notamment le droit de propriété en France).

Sous-discipline récente de la philosophie morale, l'éthique environnementale reste méconnue dans la sphère académique française. Dans le contexte de l'accélération des chan-

gements environnementaux qui remettent en cause les fondements et l'ethos des sociétés modernes, des chercheurs de plus en plus nombreux mobilisent l'éthique dans leur parcours scientifique. Cette situation indique qu'un effort de recherche important reste à entreprendre en la matière.

La conduite d'une approche interdisciplinaire de l'éthique exige par ailleurs qu'un travail de médiation entre les disciplines soit accompli afin de faire dialoguer les catégories et les concepts utilisés par les chercheurs de différents horizons.

La prise en compte de la pluralité des cultures et des conceptions du monde représente un défi important pour les éthiques environne-

mentales qui se sont développées majoritairement dans le contexte de la science occidentale, et en premier lieu dans les « nouveaux » mondes anglo-saxons imprégnés d'un imaginaire colonial de territoires vierges. Cette prise en compte implique une attention accrue à la diversité des manières culturelles de pratiquer l'éthique. Ainsi, la thématique des droits de la nature s'est principalement concrétisée dans des pays colonisés par les Occidentaux et qui ont des peuples autochtones. La possibilité de mettre en application ce type de modèle juridique dans une logique purement naturaliste doit être questionnée.

La porosité des frontières entre éthique, droit et politique se heurte à la domination du positivisme juridique qui tend à exclure du champ du droit les considérations d'éthiques environnementales. Considérer le droit dans ses normativités – c'est-à-dire les modalités normatives mises en place pour régir la vie en société – pourra nourrir la réflexion sur les enjeux d'une éthique environnementale.

Notre relation à tout vivant (microbien, animal, végétal ou humain) est multi-facettes (intellectuelle, culturelle, émotionnelle, corporelle) et peut comporter des nœuds propres à nous éloigner d'une éthique globale et appliquée.

## Moyens

Les éthiques environnementales peuvent contribuer à lever ces verrous. Quelles sont les actions à mettre en place pour que les pratiques scientifiques contribuent à une meilleure compréhension des enjeux éthiques ? Quelques suggestions :

- organiser des modules de formation aux enjeux éthiques et en particulier pour les chercheurs et les laboratoires qui n'intègrent pas les sciences humaines et sociales ; introduire de façon plus systématique des formations en sociologie, philosophie et en histoire des sciences ; former les doctorants à l'histoire de leur discipline ;
- approfondir les recherches et recruter des chercheurs dans les thématiques suivantes : éthique environnementale ; justice environnementale ; justice écologique ; sciences de la conservation ;
- libérer du temps pour instaurer un terrain d'entente favorable aux fertilisations croisées, à la réflexivité des chercheurs et aux passerelles entre les disciplines, et accroître le nombre d'espaces dédiés à ces discussions entre scientifiques ; le temps ainsi libéré pourra faire partie des critères d'évaluation des laboratoires ;
- remettre à plat les missions des différents comités d'éthique intégrant l'éthique environnementale, et créer une plateforme de partage entre comités en leur donnant plus de souplesse et en les enjoignant à plus de dialogue ;
- sécuriser l'engagement des chercheurs « lanceurs d'alerte ».

## RÉFÉRENCES

- Bonneuil, C., & Fressoz, J. B. (2013). L'événement Anthropocène : la Terre, l'histoire et nous. Seuil, Paris, pp. 320.
- Descola, P. (2005). Par-delà nature et culture, Gallimard, Paris, 800 p.
- Fernandez-Manjarrés J.-F., Roturier S., Bilhaut A.G. (2018). The emergence of the social-ecological restoration concept. *Restoration Ecology*, 26, 404-410.
- Ferdinand, M. (2019). Une écologie décoloniale. Penser l'écologie depuis le monde caribéen. Seuil, Paris, pp. 464.
- Fressoz, J.-B., & Locher F. (2020). Les révoltés du ciel : Une histoire du changement climatique XVe-XXe siècle. Seuil, Paris, pp. 320.
- Haraway D. (2016). *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene* Duke University Press, pp. 296.
- Ingold, T. (1993). The Temporality of the Landscape. *World Archaeology*, 25(2), 152-174.
- Jasanoff S. (2004). *States of Knowledge the Co-production of Science and the Social Order*. Routledge, London, pp. 332.
- Larrère C. et R. (1997). *Du bon usage de la nature. Pour une philosophie de l'environnement*. Aubier, Paris, pp. 368.
- Latour, B. (2021). Où suis-je ? leçons du confinement à l'usage des terrestres. *La découverte*, Paris, pp. 150.
- Latour, B. (2017). *Où atterrir ? : Comment s'orienter en politique*. La Découverte, Paris, pp. 160.
- Le Bot, O. (2021). Les grandes évolutions du régime juridique de l'animal en Europe : constitutionnalisation et dérégulation. *Revue québécoise de droit international*, 24, 249-257
- Leopold A., 1985 (1949). *L'Almanach d'un comté des sables*. Paris, Aubier, pp. 289.
- Le Roy É., (1999). *Le jeu des lois, une anthropologie dynamique du droit*. Paris, LGDJ, pp. 420.
- Maris, V. (2018). *La part sauvage du monde-Penser la nature dans l'Anthropocène*. Seuil, Paris, pp. 256.
- Pelluchon C (2021). *Les lumières à l'âge du vivant*. Seuil, Paris, pp. 336.
- Selosse, M.-A. (2021). *Jamais seul ! Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Acte Sud, Arles, pp. 368.
- Takeuchi K., Elmqvist T., Hatakeyama M., Kawanishi J., Turner N., Zhou D. (2014). Using sustainability science to analyse social-ecological restoration in NE Japan after the great earthquake and tsunami of 2011. *Sustainability Science*, 9, 513-526.
- Tsing, A. (2017). *Le champignon de la fin du monde: Sur la possibilité de vivre dans les ruines du capitalisme*. La Découverte, Paris, pp. 416.
- Van Dooren, T. (2014). *Flight Ways. Life and Loss at the Edge of Extinction*. Columbia University Press, New York, pp. 208
- Wandesforde-Smith, G. et al. (2021). *Coping With Human-Cat Interactions Beyond the Limits of Domesticity: Moral Pluralism in the Management of Cats and Wildlife*. *Front. Vet. Sci.*, 8, 682582.
- Sarrazin, F., & Lecomte, J. (2016). Evolution in the Anthropocene. *Science*, 351(6276), 922-923.
- Sarrazin, F. & Lecomte J. (2021). Transition évolutive et naturalité. in : *Protéger l'environnement : de la science à l'action*. Eds. Mermans E., Dussault, A. C. Editions matériologiques, Paris, pp. 245-274





# Diffusion & promotion

## de la méthode scientifique et des sciences

Auteurs : Denis Bourguet (CBGP), Thomas C. Durand (ASTEC), Thomas Guillemaud (ISA), Marc André Selosse (ISYEB)

Contributeurs : Fanny Arnaud (EVS), Daniel Berveiller (ESE), Irène Carpentier (SELMET), Julie Dabkowski (LGP), Françoise Immel (Chrono environnement), Joël Meunier (IRBI), Benoît Pujol (CRIOBE), deux auteurs anonymes

### 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Former à la vulgarisation et inciter à communiquer sur la méthode scientifique, la valoriser
- ▶ Se focaliser sur la qualité de la science plutôt que la valeur supposée des revues scientifiques
- ▶ Promouvoir les revues en accès ouvert diamant ou avec de faibles frais et aider les sociétés savantes à se diriger vers ces modèles

## Vulgarisation et diffusion scientifique

Si la science ouverte assure à tous, dans un monde idéal, l'accès aux résultats de la recherche scientifique, il serait faux de croire que la science est pour autant restituée à la société. Elle ne l'est alors qu'aux pairs et aux spécialistes. La difficulté de lecture des écrits publiés, hyperspécialisés et en langue anglaise pour la plupart, limite fortement leur diffusion auprès des non-spécialistes. La médiation scientifique est donc le maillon nécessaire entre le monde de la recherche et la société. Or, de nos jours, les découvertes et les innovations de nos domaines de recherche se traduisent par des conséquences dans la vie quotidienne de chacun. Tous les citoyens sont amenés à faire des choix, à commencer par ceux de consommation, qui demandent une information minimale. La recherche est de plus en plus sollicitée dans le débat public afin de répondre à des interrogations de la société dans un contexte de crises sociale, économique, environnementale et sanitaire. Toutefois, l'actualité montre que la

désinformation (fausse information donnée délibérément) ou la mésinformation (fausse information donnée par erreur) peuvent être diffusées largement et prises pour des faits établis.

Dans ce contexte, il est fondamental qu'un maximum de citoyens dispose des connaissances permettant d'apprécier les situations où ils se trouvent, en particulier en lien avec l'évolution biologique, la place de l'humanité dans le vivant, le fonctionnement des écosystèmes – tout en ayant une bonne notion de la manière dont ces connaissances ont été produites (méthodes et histoire des sciences).

Les discussions ont relevé que la vulgarisation s'étendait de la communication (pouvant être définie comme la transmission unidirectionnelle d'éléments, dans un but promotionnel) à la médiation (transmission plus interactionnelle, dans un but éducatif). Ces aspects ont fait l'objet de réflexions, en amont et durant les prospectives, qui peuvent être résumées autour de sept aspects.

### Désacraliser positivement les scientifiques

Des échanges avec le grand public et/ou des scolaires permettent bien souvent de désacraliser les chercheurs et, pour ces derniers, de prendre le temps d'expliquer leur métier et ce que l'on peut attendre de leur recherche (ex. Fête de la science). En vulgarisation, l'impact le plus important que nous puissions avoir est probablement atteint en ciblant le public scolaire (élèves, enseignants) qui apparaît comme une clé. Les élèves sont en phase d'apprentissage et peuvent, par le biais des moyens de médiation scientifique, découvrir la culture scientifique ainsi que les nombreux métiers associés à la recherche. Le lien aux chercheurs permet également de développer le sens critique, outil démocratique indispensable dans une société d'information de masse.

Nous devons en particulier nous méfier de l'image d'une science « à la solde de... » alimentée par et alimentant les croyances conspirationnistes. Qu'avons-nous raté dans notre manière de communiquer sur la science pour en arriver là, et que devons-nous faire pour redonner le goût

des sciences ? La question est aussi ouverte qu'incontournable. L'information systématique sur les sources de financement de la recherche vulgarisée (ou des équipes auxquelles appartient celui qui vulgarise) pourrait contribuer à contrecarrer les croyances conspirationnistes sur le pilotage systématique de la science par des groupes d'intérêt.

Des méthodes d'apprentissage par la recherche, via des projets de sciences citoyennes par exemple, participent également au mouvement de démocratisation de la recherche et de l'accès aux connaissances. Des projets comme le projet DECODER ([www.journal.decoder.fr](http://www.journal.decoder.fr)) ou « Retour à l'école » mobilisent classes et chercheurs sur la rédaction d'articles de vulgarisation, d'articles originaux ou de la mise en place de petites expériences : ces projets peuvent captiver les plus jeunes dans un exercice où le chercheur a son plein rôle. Ils doivent être encouragés institutionnellement et il faut envisager plus clairement la valorisation et la diffusion de ces projets et des productions associées.

## Évaluer et valoriser la vulgarisation

Les chercheurs, producteurs des connaissances, sont de plus en plus nombreux à s'engager dans des actions à destination du grand public, en vulgarisant leurs résultats. Ils sont aussi de plus en plus soutenus dans leurs actions par leurs institutions et laboratoires ; tant mieux car comme le faisait remarquer un participant : « *cela fait partie des missions des chercheurs, mais il y en a beaucoup au total* ». Les grandes institutions de recherche proposent à la lecture de nombreux communiqués de presse sur leurs sites internet, et multiplient les actions et publications de médiation destinées au grand public (ex. le CNRS avec son journal <https://lejournal.cnrs.fr/grand-public>, l'INRAE <https://www.inrae.fr/apprendre-comprendre>, ou encore le magazine de l'INSERM <https://www.inserm.fr/information-en-sante/magazine-science-et-sante>). La médiation scientifique est ainsi devenue une activité incontournable de la recherche

et de l'enseignement supérieur.

Vus comme des formes de productions scientifiques, les produits et l'activité de vulgarisation doivent être pris en compte dans les carrières des chercheurs et les évaluations des équipes, au même titre que les activités de recherche ou d'enseignement. Les commissions d'évaluation apprécient de plus en plus l'existence d'un volet médiation scientifique dans les activités scientifiques mais il reste à s'assurer que ce soit toujours le cas et qu'une activité de vulgarisation puisse être vue comme remplaçant une partie du reste de l'activité scientifique. De plus, cela pose la question de ce qu'on évalue : une action, un texte, une conférence ne suffit pas car la question de la qualité et de l'impact public se pose. Il faut réfléchir institutionnellement aux évaluateurs ou aux critères, et les utiliser de façon homogène dans tous les domaines d'évaluation.

## Aider les chercheurs à vulgariser

Vulgariser demande de cerner l'audience et ses besoins, de partir des repères qui lui sont propres. Il faut distraire mais sans risquer de ne passer que des informations éparses : un message structurant et une méthode (voir plus bas) doivent aussi être transmis. Enfin, simplifier et prendre des métaphores peut être utile, mais cette pratique doit s'arrêter là où commence la dénaturation du fond du message dans l'esprit de celui à qui est destinée la vulgarisation. Ces impératifs sont peu aisés et doivent aussi être gérés institutionnellement, au regard de la charge de travail des chercheurs et aussi de la nécessité de les préparer à une tâche nouvelle pour eux. Au-delà des *media training* que l'institution offre à certains de ses chercheurs, des kits et recommandations simples, à manier/pratiquer en autonomie, doivent être disponibles pour tous et à tout instant, en particulier pour ceux qui sont sollicités de façon inattendue par l'actualité. En effet, on est souvent en réponse, parfois imprévue, et on n'organise ni le thème, ni le tempo des aspects traités par l'actualité.

Un débat a pris forme, au cours des prospectives, sur l'intérêt pour le CNRS de désigner ou

d'accréditer ceux qui peuvent s'exprimer, dans tel ou tel domaine, sous le label de leurs fonctions, par exemple à la suite de formations *ad hoc* (chacun restant bien sûr libre de s'exprimer comme citoyen). Il ne s'est pas fait de consensus car le risque existe de limiter la liberté de parole et d'imposer une forme de contrôle désagréable. Une fois encore, former ceux qui souhaitent vulgariser paraît être une meilleure option gérant en amont le risque de communications maladroitement. Une autre possibilité, quand cela est réalisable, est un système de relecture par des pairs expérimentés en vulgarisation (pour les articles au moins). Puisque la recherche garantit la qualité de ses résultats via un système d'évaluation par les pairs, pourquoi ne pourrait-il pas en être de même pour la médiation et la communication scientifique ? Un tel dispositif ciblerait exclusivement les contenus (pas la forme de la médiation) et pourrait même prendre la forme d'un label de qualité qui importerait vis-à-vis du public ; il pourrait aussi servir en évaluation de la recherche, puisque les évaluateurs sont dès à présent amenés à donner plus de place aux actions de médiation qu'auparavant.

Les actions de *media training* qui préparent en particulier aux formats et aux attentes journalistiques ou des réseaux sociaux doivent être soutenues. Il faut, enfin, amplifier l'action et le

recensement des agents potentiellement mobilisables autour de la vulgarisation par les services de presse afin de disposer de bonnes listes de ressources au niveau de l'institution.

### Recenser l'existant

L'offre de vulgarisation, sous toutes ses formes, est souvent dispersée : il en résulte une difficulté d'accès pour le public mais aussi un risque de dupliquer les interventions. Cette offre est souvent de qualité mais parfois mêlée de contenus plus pernecieux, où des acteurs prennent les allures de la communication scientifique pour étayer une opinion, voire propager des contre-vérités. Une offre croissante existe en science participative, pas toujours aisée à déterminer – et souvent il conviendrait, en ce domaine comme en d'autres de la vulgarisation, de faire synergie plutôt que compétition ou de duplication involontaire.

Dans ce contexte, recenser les initiatives, d'abord internes puis aussi externes (par exemple, recueillies sur un portail déclaratif), peut à la fois clarifier l'offre et aussi éviter les acteurs indésirables. Cela peut prendre la forme d'un site web listant les initiatives, voire les labellisant : il serait illusoire de penser que seules les actions référencées seront utiles ou bonnes, mais du moins cette liste ne contiendrait que des initiatives acceptables. Elle aiderait les demandeurs (écoles, associations, citoyens mais aussi journalistes) à trouver des sources fiables.

### Quels médias ?

De très nombreuses nouvelles initiatives de médiation et diffusion de la culture scientifique fleurissent ces dernières années (chaînes YouTube, blogs scientifiques, ouvrages et articles de vulgarisation, journaux scientifiques vulgarisés...). Les pratiques modernes de diffusion de l'information constituent un outil positif évident mais portent également des travers potentiels. Par exemple, parce que nous sommes limités dans nos capacités à absorber l'information au quotidien, les opérateurs de données (dont les réseaux sociaux) offrent des contenus en fonction de nos centres d'intérêts et cloisonnent ainsi notre espace d'information. Dans beaucoup de médias, l'information scientifique se retrouve diluée et traitée sur un pied d'égalité avec des opinions ou des croyances. De plus, l'information fautive ou non vérifiée diffuse beaucoup plus vite que l'information scientifique : il est alors illusoire de

démentir ou de rectifier. Il faut s'interroger sur la façon d'utiliser les nouveaux médias, notamment pour éviter d'alimenter seulement un public déjà conquis et informé.

D'un côté, il faut maximiser l'utilisation des moyens classiques, dont les formes les plus simples à préparer comme des accueils du public ou des cafés scientifiques, ou une vigilance sur Wikipédia. D'un autre côté, il faut innover. Le CNRS tente déjà de développer de nouveaux types d'actions, comme par exemple les Échappées inattendues. Il faut sans doute mieux utiliser les vulgarisateurs de qualité extérieurs au CNRS et interagir avec eux, aller au-devant de leurs réalisations (blogs, podcasts), les promouvoir voire les aider financièrement. Il faut en effet savoir viser le plus jeune public, par des formes alternatives qui sont les siennes.

### Communiquer sur la méthode

On doit parler de la méthode, et ne pas dissenter que de résultats, c'est-à-dire du produit fini, et bien insister sur les incertitudes (sans pour autant vider de sens le message). L'information

autour de la Covid l'a montré : les controverses et les débats, qui sont pourtant au cœur de l'activité scientifique et fondent le sérieux de ses conclusions, ont décontenancé le public. Le statut de

la connaissance scientifique et sa construction doivent plus être mis en évidence, en un mot démythifiés. En effet, la défiance de certains citoyens envers la science réside souvent dans le caractère non immuable de celle-ci. La notion d'hypothèse scientifique, qui n'est jamais complètement validée par la communauté scientifique et qui pourra être remplacée par une nouvelle hypothèse, apparaît comme une absence de fiabilité de la science plutôt que comme une approche raisonnée et raisonnable. Il paraît important de nourrir de manière équilibrée la médiation scientifique de trois éléments indissociables : les connaissances, les méthodes de production de ces connaissances (démarches scientifiques), et l'histoire des sciences et des idées.

Anticiper le sentiment que la science peut débattre et changer d'avis, cela passe aussi par la

formation des plus jeunes : CNRS Écologie & Environnement ne peut s'exonérer d'émettre un avis circonstancié ou des recommandations (n'empiétant pas sur la pédagogie elle-même) sur la place et les méthodes d'enseignement des sciences qu'elles représente dans le tronc commun de l'Éducation Nationale, du primaire au secondaire. Il ne sert à rien d'imaginer une vulgarisation s'il n'existe pas pour elle un public réceptif ; de plus, les crises sanitaires et environnementales récentes montrent que nos disciplines ont un lien étroit à la compréhension de l'actualité et à la décision citoyenne (elles ont d'ailleurs poussé à la publication par le Conseil scientifique de CNRS Écologie & Environnement de *Regards croisés sur la pandémie* sous la direction de P. Gibert, CNRS Éditions, 2021). La formation initiale de tous doit comprendre une approche élémentaire d'épistémologie et d'histoire des sciences.

### Les messages de la médiation

La médiation devrait couvrir un spectre le plus large possible, et ne pas se concentrer sur ce qui plaira le plus au public et aux financeurs (les dinosaures et les hominidés dans le cas de la paléontologie, par exemple). Ceci est souvent en contradiction avec les impératifs économiques qui contraignent l'action des professionnels de la médiation, qui visent à toucher le plus grand nombre au sein du public tout en travaillant trop souvent avec un nombre restreint de scientifiques « sources ». C'est également symptomatique d'une science dirigée, qui vise à privilégier des aspects particuliers de la recherche perçus comme les plus innovants ou les plus disruptifs. Ces sujets, plus à la mode, vont de fait prendre une place prépondérante en matière de communication et de médiation, et cacher le plus utile aux citoyens.

La mise en avant systématique des moments « *eurêka* », des grandes découvertes, des génies providentiels et des bons communicants ne représentent qu'une fraction réduite de l'activité scientifique et éclipsent la réalité collective de la recherche. Pourtant la vulgarisation à l'occasion de la sortie d'articles va en ce sens. Il faut faire comprendre que la recherche n'est pas une succession d'actes isolés, mais un processus collectif, réticulé et continu. Cela rejoint aussi le point précédemment évoqué de l'existence d'un débat

scientifique normal qui doit être distingué des polémiques médiatiques.

De tous les citoyens, les chercheurs et chercheuses sont les plus à même d'anticiper quelles thématiques souffrent d'un déficit de lisibilité dans le public et lesquelles risquent de devenir des sujets d'actualité. Ils peuvent contribuer à anticiper les crises en évitant des situations trop souvent rencontrées dans lesquelles l'ignorance générale se focalise sur quelques pseudo-experts télégraphiques capables d'affirmer des faussetés avec aplomb, ou de vendre une solution illusoire. En anticipant, nous pouvons éviter les scénarios où, cantonnée dans la réponse et peu audible, la communauté scientifique pâtit d'une baisse de confiance d'un public qui constate que les postures d'autorité associées à l'exercice de la science peuvent être trompeuses. Ce rôle anticipatif ne peut être pleinement joué que s'il existe des structures de promotion des sciences sensibles et réactives à ces « alertes épistémiques ».

## Enjeux liés à la science ouverte

### Pourquoi et comment tendre vers une véritable science ouverte ?

La science ouverte est ici comprise comme la mise à disposition libre et gratuite des échantillons, données, méthodes, scripts, logiciels, codes, publications, évaluations et processus éditoriaux (Wikipedia), si possible dans un cadre FAIR (trouvable, accessible, interopérable et réutilisable).

Durant les cinq dernières années, la volonté du monde scientifique « d'ouvrir la science » est à l'ordre du jour de nombreuses institutions de recherche (MESRI, 2021 ; UNESCO, 2021), d'agences de financement de projets de recherche (<https://anr.fr/fr/lanr/engagements/la-science-ouverte/>) et de la commission européenne (<https://erc.europa.eu/manage-your-project/open-science>).

Dernièrement, la crise sanitaire mondiale de la Covid-19 a définitivement démontré l'importance d'une science ouverte, permettant une diffusion rapide et sans entrave des résultats des recherches, et offrant à tous les acteurs les informations nécessaires pour mieux comprendre et appréhender la situation (OECD, 2020).

#### Pourquoi la science ouverte ?

Les études scientifiques financées sur fonds publics et les productions qui en découlent (méthodes, données, publications, logiciels) sont des biens communs et doivent donc être accessibles. Cette idée force est en cohérence avec le contexte politique et législatif français (MESRI, 2021) et le contexte politique international (UNESCO, 2021) qui portent la science ouverte comme une priorité.

La science ouverte est également un outil permettant une meilleure traçabilité et reproductibilité de la science. Les sciences expérimentales et la biologie en particulier connaissent une crise de reproductibilité : entre 20 et 60 % des études ne sont pas reproductibles (Prinz *et al.*, 2011, Begley *et al.*, 2012, Errington *et al.*, 2021, Ioannidis *et al.*, 2009). C'est problématique car les développements scientifiques en écologie et environnement ne peuvent se réaliser que sur de solides fondations, vérifiables et réutilisables. Il est donc primordial que les chercheurs produisent des recherches les plus

transparentes et documentées possibles.

Les raisons de ce manque de reproductibilité sont multiples, mais elles sont toutes liées à la pression d'obtenir de « beaux résultats » le plus rapidement possible : le regard des pairs, la sur-implication individuelle, la compétition, le fameux « *publish or perish* » (évaluation, avancement des carrières, capacités à obtenir des financements, primes...) (*The Academy of Medical Sciences*, 2015).

Ce problème de non reproductibilité des sciences expérimentales recouvre des réalités assez différentes (*The Academy of Medical Sciences*, 2015) :

- manque de détails dans la section « Matériel et Méthodes » des articles, rendant impossible les reproductions d'études (ce problème est estimé comme probablement très fréquent) ;
- absence de partage des données, rendant impossible les reproductions d'analyse statistique (moyennement fréquent) ;
- biais de résultats positifs : 1) non publication de résultats négatifs par les revues (fréquent) et 2) les scientifiques ne soumettent pas pour publication leurs résultats négatifs et ils répètent leurs expériences (négatives) jusqu'à obtenir le résultat positif escompté (fréquent) ;
- baisse de la proportion de vrais positifs due à des puissances des tests statistiques insuffisantes et à des dimensionnements d'expérience insuffisants (fréquent). La proportion de vrais positifs est une fonction croissante de la puissance statistique ;
- analyses (et ré-analyses) trop gourmandes en temps de calculs pour être aisément répliquées dans le temps imparti à l'évaluation par les pairs des articles ;
- analyses statistiques inappropriées (fréquent) ;
- HARKing (*Hypothesis After the Results are Known*) : hypothèses formulées après avoir obtenu les résultats (fréquent) ;
- *p-hacking* : de nombreux tests statistiques sont réalisés sur les données et seuls les tests significatifs sont présentés (fréquent) ;
- données modifiées ou inventées (peu fréquent).



Les tentatives de reproduction systématique d'études en biologie (Prinz *et al.*, 2011, Begley *et al.*, 2012, Ioannidis *et al.*, 2009, Errington, 2021) montrent toutes des problèmes saillants de reproductibilité et un taux de reproductibilité inférieur à 30 %. Les chercheurs disent être victimes de cette crise de la reproductibilité et reconnaissent avoir des pratiques scientifiques discutables (sondage basé sur 1500 chercheurs, essentiellement en sciences naturelles, Baker, 2016). Le plus inquiétant est certainement le sondage du *National Survey on Research Integrity* aux Pays-Bas : parmi 6800 chercheurs, 4 % ont fabriqué des données, 4 % ont falsifié des résultats ou des analyses, 50 % ont eu des pratiques de recherche discutables (« *questionable research practices* ») (Gopalakrishna, 2022). La crise de la reproductibilité est donc factuelle

et peut avoir des conséquences dramatiques en sciences.

Afin de rendre accessible les biens communs de la recherche publique et de promouvoir une plus grande reproductibilité de la science, nous préconisons :

- un changement de modèle de publication pour assurer un accès libre aux publications et à moindre frais pour les institutions ;
- un partage systématique des données, méthodes, scripts et codes ;
- l'utilisation des *Registered Reports* ;
- une réforme de l'évaluation des scientifiques.

Ces quatre points sont détaillés dans les parties suivantes, chacun étant assorti de propositions concrètes de mise en œuvre.

## Changer de modèle de publication

Actuellement, cinq éditeurs commerciaux forment un oligopole publiant plus de 50 % des articles scientifiques (Larivière *et al.*, 2015), totalisant près de 40 % de part de marché au niveau mondial et affichant des marges bénéficiaires proches de 40 % (BRCP, 2022). Or, la majeure partie des articles publiés par ces éditeurs ne sont pas en accès libre : leur consultation nécessite un abonnement institutionnel ou un paiement en ligne. Pour une publication en accès libre, les auteurs doivent payer, via leurs institutions, des frais de publication de l'ordre de 1000 à 3000 euros par article (Morrison, 2019). Ces frais peuvent être prohibitifs en particulier pour des équipes disposant de ressources financières limitées. Cette situation n'est clairement pas tenable ; des changements majeurs sont amorcés, d'autres sont encore nécessaires.

Dans ce contexte, il faut rappeler l'existence de nombreuses revues à comité de lecture sans but lucratif ni commercial (68 % des revues indexées dans le DOAJ\*). Sans coût pour les auteurs, souvent internationales, elles sont en accès libre immédiat ou à court terme via des plateformes comme *OpenEdition* (605 revues, 13616 livres) ou le *Centre Mersenne* (23 revues).

Le processus éditorial de ces revues est assuré pour tout ou partie par des chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens. La parution d'une revue scientifique reste toutefois coûteuse - elle s'élève par exemple à 2000 ou 3000 euros en moyenne pour un seul fascicule d'une centaine de pages contenant 4-5 articles (par exemple pour les revues *Quaternaire* et *Géomorphologie*). Ces frais sont couverts par les abonnements, par des frais de publication (même modestes, c'est-à-dire de moins de 500 euros par article) ou encore par des aides directes accordées par les institutions de recherche ou les sociétés savantes qui détiennent ces revues.

Le passage en accès ouvert implique mécaniquement, pour une revue, la diminution du nombre d'abonnés et donc des recettes permettant de financer la publication de la revue. Cette situation est de plus en plus intenable pour les revues scientifiques nationales indépendantes qui voient ainsi leur avenir compromis. L'ouverture a un coût qui, s'il n'est assuré ni par les auteurs, ni par les lecteurs, ne peut pas non plus être porté par les associations ou les laboratoires éditeurs à eux seuls. Le dévelop-

pement de la science ouverte nécessite donc un engagement institutionnel fort et la mise en place de soutiens financiers et/ou logistiques et techniques conséquents pour les revues indépendantes sans but lucratif.

Ces dernières années, plusieurs établissements de recherche et d'enseignement supérieur, en France et à l'étranger, ont décidé de ne plus souscrire d'abonnement auprès de certains éditeurs commerciaux (<https://bigdeal.sparcopen.org/cancellations>). Les économies ainsi dégagées pourraient notamment permettre de financer plus largement les revues indépendantes et la mise en place du « Plan de soutien à l'édition scientifique française » recommandé par le Comité ministériel pour la science ouverte (MESRI, 2021). Ce plan pourrait également renforcer la mise à disposition par les institutions publiques de personnels qualifiés qui assureraient par exemple les étapes techniques de mise en page (PAO) et de mise en ligne des articles ; un tel support logistique pouvant aisément être mutualisé et ainsi bénéficier à plusieurs revues indépendantes.

### Propositions

- faire connaître et s'inspirer de la *Fair Open Access Alliance* (<https://www.fairopenaccess.org/>), un groupe d'universitaires et de bibliothécaires dont l'objectif est de rendre le contrôle

du processus de publication à la communauté scientifique. Cette alliance comprend *LingOA*, *MathOA*, *PsyOA*, ou encore le *Free Journal Network* ;

- promouvoir les structures de propriété transparente des revues scientifiques, contrôlées par la communauté scientifique ;
- promouvoir les revues en accès ouvert diamant (sans APC\*) ou avec des APC couvrant simplement les frais incompressibles de fonctionnement des revues ; des membres de l'atelier proposent que le CNRS ne considère dans les bilans de ses chercheurs et chercheuses que les publications dans ce type de revue ;
- aider les sociétés savantes à se détourner des éditeurs commerciaux, en les conseillant et subventionnant ;
- passer la revue *Ecology Letters* en *open access* Diamant, opération aisée puisque 2 agents CNRS s'occupent déjà de la revue ;
- promouvoir la soumission, le *reviewing* et le travail éditorial dans les revues diamant.

### Vers un partage systématique des données, méthodes, scripts...

Une manière de contrer la crise de reproductibilité présentée plus haut est de rendre possible la reproduction des résultats scientifiques. Il s'agit de rendre disponibles les éléments permettant de reproduire et de partager les résultats bruts pour pouvoir reproduire leurs transformations et leurs analyses. L'idée est donc de tendre vers – voire de rendre obligatoire – le partage des échantillons, des données, des scripts, des codes d'analyse et des logiciels de traitement, quand c'est possible. « Quand c'est possible » signifie que, pour des raisons juridiques et/ou éthiques, la non publication des données est permise (données à caractère personnel, données politiquement sensibles, espèces en danger, protocole de Nagoya sur l'accès aux ressources génétiques...). On note ici que les collaborations avec

le secteur privé devraient se conformer à cette obligation d'ouverture puisqu'elles impliquent également des fonds publics.

Ce partage systématique des produits de la recherche aura pour conséquence d'aider à disséminer des idées, de motiver et faciliter de nouvelles analyses. En particulier, il sera plus simple de réaliser des études consistant en des reproductions de résultats, point fondamental dans le cadre de la recherche incrémentale. De plus, le partage motivera de nouvelles études (hors reproduction), car les méthodes, scripts, codes ne sont jamais complètement spécifiques à une étude et sont en partie génériques et les données, méthodologies, scripts, codes constituent des données primaires pour le champ disciplinaire de la *meta-research*.

## Propositions

- Améliorer la traçabilité des résultats scientifiques et les méthodes de travail : mise à plat, *versioning*, amélioration incrémentale des travaux ;
- promouvoir ou obliger le partage des échantillons, données, méthodes, scripts, codes en respectant les principes FAIR permettant la réutilisation et la reproduction des travaux par les évaluateurs ou n'importe quel autre scientifique ;
- promouvoir la reproduction d'études déjà publiées.

## Accorder une plus grande importance à la démarche qu'aux résultats : les *Registered Reports*

Il existe un paradoxe important dans la pratique de la science : 1) les résultats sont un objet quasi sacré en science : il ne faut surtout pas y toucher ou les manipuler, mais 2) il existe de nombreuses – et mauvaises – raisons de les modifier car les résultats sont plus faciles à publier, plus gratifiants, plus valorisants, plus cités s'ils sont brillants (neufs, étonnants, généraux...).

Les *Registered Reports* (RR) (Chambers & Tzavella, 2022) permettent de s'affranchir de ce problème. Au lieu d'écrire un article et de l'envoyer pour évaluation à la fin du processus de recherche, l'idée est d'écrire un plan de recherche (un pré-enregistrement - *preregistration* en anglais), (Nosek et al., 2018) et de le faire évaluer (sous forme de RR), et éventuellement de le faire accepter par une revue avant l'obtention des résultats. La pertinence de la question de recherche et des hypothèses, le détail et la faisabilité de la méthodologie, la capacité des expérimentations/traitements à répondre à la question posée, la pertinence et la puissance des traitements statistiques sont ainsi évalués avant obtention des résultats. Ces résultats ne sont pas utilisés pour évaluer le RR car ils ne sont pas encore disponibles.

En cas d'acceptation de principe, les chercheurs réalisent leur étude, obtiennent leurs résultats, écrivent leur article complet et le re-soumettent à la revue qui s'est engagée à l'accepter. Une deuxième évaluation, plus légère, a alors lieu pour vérifier que ce qui avait été annoncé a été correctement réalisé et que les conclusions sont supportées par les résultats. Des ajustements sont possibles par rapport à ce qui avait été prévu dans le RR s'ils sont correctement argumentés. Cette deuxième étape d'évaluation ne s'intéresse pas au fait que les résultats soient positifs, nouveaux ou brillants.

Les conséquences de l'utilisation des RR sont

nombreuses : l'évaluation a lieu lorsque les plans peuvent encore être facilement modifiés et donc, quand elle est le plus utile ; on distingue bien les tests d'hypothèses de la production d'hypothèses ; on évite le *p-hacking*, le « *selective reporting* », les biais de résultats positifs (Allen & Mehler, 2019, Obels et al., 2022), la qualité de la science augmente (Soderberg et al., 2021) et on augmente le taux d'acceptation des articles (Chambers, 2019).

Plus de 300 journaux acceptent d'évaluer des RR (Chambers & Tzavella, 2022) dont une dizaine qui concernent les chercheurs de CNRS Écologie & environnement (liste disponible dans le site <https://topfactor.org/>). La plateforme *PCI Registered Reports* propose des innovations importantes permettant d'évaluer les RR de façon efficace ([https://rr.peercommunityin.org/about/full\\_policies](https://rr.peercommunityin.org/about/full_policies)) et est associée à de nombreux journaux qui publient les RR positivement évalués par PCI RR ([https://rr.peercommunityin.org/about/pci\\_rr\\_friendly\\_journals](https://rr.peercommunityin.org/about/pci_rr_friendly_journals)).

La communauté en écologie, biologie de l'évolution et environnement utilise encore peu les RR. Cette appréhension est probablement liée à une perception erronée des risques et complexités qui leur sont - à tort - associés (voir la table 1 de Chambers & Tzavella, 2022). De plus, la communauté attend probablement des démonstrations de la qualité et de la reconnaissance de cette pratique scientifique dans leur domaine. Quelques « éclaireurs », conscients du peu de risque et des avantages de l'utilisation des RR, devront ouvrir la voie (la même remarque pourrait également être faite pour les « *data papers* » qui sont également liés à la transparence et la reproductibilité). CNRS Écologie & Environnement pourrait accompagner ces éclaireurs en promouvant et en formant ses scientifiques à l'utilisation des pré-enregistrements et des RR.

### Propositions

- Sensibiliser les étudiants et les chercheurs à la crise de reproductibilité et aux pratiques de recherche discutables ;
- former les étudiants et chercheurs aux RR et promouvoir leur utilisation.

### Pourquoi et comment adapter l'évaluation de la recherche à la pratique de la science ouverte

Si l'on déplore l'oligopole des éditeurs commerciaux, il faut aussi s'interroger sur la valeur accordée par les institutions et les scientifiques eux-mêmes aux articles parus dans les revues publiées par ces éditeurs, généralement à fort facteur d'impact. En effet, que ce soit dans le cadre des concours de recrutement, de l'évaluation et la promotion des scientifiques et enseignants-chercheurs ou même de l'évaluation des unités de recherche, ces articles ont généralement plus de « poids » que ceux parus dans des revues indépendantes, nationales ou internationales. Pourtant, ces dernières assurent, pour nombre d'entre elles, des processus de relecture par les pairs tout aussi rigoureux et garantissent ainsi la diffusion de façon complète et détaillée de données scientifiques de qualité.

Les ambitions portées par les institutions publiques françaises et européennes « d'ouvrir la science » devraient donc s'accompagner d'un réexamen des critères d'évaluation des revues, en attachant plus de valeur au processus d'évaluation, au modèle éthique et économique de celles-ci et à la qualité des articles qui y sont publiés qu'à leur facteur d'impact, ce qui inciterait davantage les chercheurs à publier dans des revues indépendantes et en accès ouvert.

Cette demande rejoint les préconisations du Comité ministériel pour la science ouverte à « valoriser la science ouverte et la diversité des productions scientifiques dans les évaluations des chercheurs et des établissements » et à « réduire l'emprise de l'évaluation quantitative au profit de l'évaluation qualitative » (Deuxième Plan National pour la Science Ouverte, 2021-2024).

Le CNRS a déjà pris position de manière forte sur ce sujet, étant dans les premiers signataires d'une coalition pour réformer l'évaluation de la recherche (<https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/reforme-de-levaluation-des-scientifiques-le-cnrs-parmi-les-premiers-signataires>).

Une piste complémentaire à explorer serait de changer de paradigme et donner beaucoup plus d'importance au travail de *reviewing*. Par exemple, en encourageant les *reviewers* à véritablement analyser la robustesse scientifique des articles, et pas simplement leur cohérence apparente : vérifier que les données sont bien disponibles et réutilisables, reconduire les analyses et ainsi confirmer les résultats, vérifier que les conclusions des auteurs correspondent à ce que proposent les statistiques, afin de limiter le risque de non-reproductibilité. Ce travail de *reviewing* approfondi demande du temps. Il faudrait donc reconnaître davantage le travail de *reviewer*, accepter qu'un scientifique passe du temps (jusqu'à plusieurs semaines si nécessaire) à évaluer un article et que l'action de *reviewer* soit autant reconnue par les commissions d'évaluation que celle de publier un article en tant qu'auteur. Il est aussi important pour l'avancée des connaissances que des auteurs proposent de nouveaux résultats et hypothèses, et que les pairs vérifient de concert avec les auteurs la solidité des nouvelles avancées. Certaines revues (en accès ouvert et gratuites pour les auteurs) offrent cette possibilité en proposant un système de *peer-review* interactif et public (ex. *Earth system Science Data*).

### Propositions

- Persévérer et communiquer sur la valeur de la science plutôt que de parler de la valeur des revues scientifiques où sont publiés les articles ;
- reconnaître le travail de *reviewing* comme faisant partie intégrante de la production des connaissances ;
- accorder du temps long aux scientifiques pour qu'ils participent au *reviewing* à la hauteur de son importance.

## RÉFÉRENCES

- Allen, C. & Mehler, D.M.A. (2019). Open science challenges, benefits and tips in early career and beyond. *PLOS Biology*, 17, e3000246. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000246>
- Baker, M. (2016). 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*, 533, 452–454. <https://doi.org/10.1038/533452a>
- Begley, C.G. & Ellis, L.M. (2012). Raise standards for preclinical cancer research. *Nature*, 483, 531–533. <https://doi.org/10.1038/483531a>
- BRCP (2022). Against Parasite Publishers: Making Journals Free. Report. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7212922>
- Chambers, C. (2019). The Registered Reports Revolution Lessons in Cultural Reform. *Significance*, 16, 23–27. <https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2019.01299.x>
- Chambers, C.D. & Tzavella, L. (2022). The past, present and future of Registered Reports. *Nat Hum Behav*, 6, 29–42. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01193-7>
- CNRS (2019). Feuille de route du CNRS pour la Science ouverte. [https://www.science-ouverte.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/11/Plaqueette\\_Science-Ouverte\\_18112019.pdf](https://www.science-ouverte.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/11/Plaqueette_Science-Ouverte_18112019.pdf).
- Errington, T.M., Denis, A., Perfito, N., Iorns, E. & Nosek, B.A. (2021). Challenges for assessing replicability in preclinical cancer biology. *eLife*, 10, e67995. <https://doi.org/10.7554/eLife.67995>
- Gopalakrishna, G., Riet, G. ter, Vink, G., Stoop, I., Wicherts, J.M. & Bouter, L.M. (2022). Prevalence of questionable research practices, research misconduct and their potential explanatory factors: A survey among academic researchers in The Netherlands. *PLOS ONE*, 17, e0263023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263023>
- Ioannidis, J.P.A. (2005). Why Most Published Research Findings Are False. *PLOS Medicine*, 2, e124. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124>
- Ioannidis, J.P.A., Allison, D.B., Ball, C.A., Coulibaly, I., Cui, X., Culhane, A.C., et al. (2009). Repeatability of published microarray gene expression analyses. *Nat Genet*, 41, 149–155. <https://doi.org/10.1038/ng.295>
- INRAE. La Politique de Science Ouverte d'INRAE. [https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Politique\\_INRAE\\_Science\\_Ouverte.pdf](https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Politique_INRAE_Science_Ouverte.pdf)
- Larivière, V., Haustein, S. & Mongeon, P. (2015). The Oligopoly of Academic Publishers in the Digital Era. *PLOS ONE*, 10, e0127502. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127502>
- MESRI (2021). Le Plan national pour la science ouverte 2021-2024 : vers une généralisation de la science ouverte en France. <https://www.ouvrirlascience.fr/deuxieme-plan-national-pour-la-science-ouverte/>
- Morrison, H. (2019). APC price changes 2019 – 2018 by journal and by publisher. Sustaining the knowledge commons. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708274114>
- Nosek, B.A., Ebersole, C.R., DeHaven, A.C. & Mellor, D.T. (2018). The preregistration revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 2600–2606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708274114>
- OECD (2020). OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19). Why open science is critical to combatting COVID-19. <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/why-open-science-is-critical-to-combatting-covid-19-cd6ab2f9/>
- Obels, P., Lakens, D., Coles, N.A., Gottfried, J. & Green, S.A. (2020). Analysis of Open Data and Computational Reproducibility in Registered Reports in Psychology. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 3, 229–237. <https://doi.org/10.1177/2515245920918872>
- Prinz, F., Schlange, T. & Asadullah, K. (2011). Believe it or not: how much can we rely on published data on potential drug targets? *Nat Rev Drug Discov*, 10, 712–712. <https://doi.org/10.1038/nrd3439-c1>
- Rodgers, P. & Collings, A. (2021). What have we learned? *eLife*, 10, e75830. <https://doi.org/10.7554/eLife.75830>
- Smaldino, P.E. & McElreath, R. (2016). The natural selection of bad science. *Royal Society Open Science*, 3, 160384. <https://doi.org/10.1098/rsos.160384>
- Soderberg, C.K., Errington, T.M., Schiavone, S.R., Bottesini, J., Thorn, F.S., Vazire, S., et al. (2021). Initial evidence of research quality of registered reports compared with the standard publishing model. *Nat Hum Behav*, 5, 990–997. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01142-4>
- The Academy of Medical Sciences (2015). Reproducibility and Reliability of Biomedical Research: Improving Research Practice; <https://acmedsci.ac.uk/file-download/38189-56531416e2949.pdf>
- UNESCO. (2021). Recommendation de l'UNESCO sur une science ouverte. Available at: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949\\_fre.locale=en](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949_fre.locale=en). Last accessed 28 March 2023.
- Wikipedia. « Open science ». [https://en.wikipedia.org/wiki/Open\\_science#Sources](https://en.wikipedia.org/wiki/Open_science#Sources)





# Co-construction des savoirs

Auteurs : Sophie Caillon (CEFE), Bastien Castagneyrol (BIOGECO), Romain Julliard (CESCO)

## 3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Favoriser des modes d'évaluations individuelles et collectives, considérant l'impact des recherches sur les parties-prenantes et assurant une reconnaissance matérielle et immatérielle du rôle des partenaires non-académiques
- ▶ Créer au sein des institutions des métiers de médiation et permettre d'innover sur les modes de partage des résultats de recherches
- ▶ Adapter des financements pour intégrer les itérations et le temps longs inhérents aux projets

## Introduction

La sociologue indienne Vandana Shiva (entre autres 1993, 1996) affirme que les « sciences modernes sont typiquement réductionnistes », car elles restreignent leur champ d'étude à des objets très spécifiques, en excluant toute forme de connaissances n'appartenant pas à leur propre sphère, largement auto-promue. Le clivage entre les sciences académiques et la société revêt trois formes d'exclusion : ontologique, épistémologique et sociologique. Pour ce qui est de l'agriculture par exemple, l'exclusion ontologique souligne le fossé entre les scientifiques académiques, focalisés sur les rendements, et les agriculteur-rices attachés aux qualités organoleptiques ou aux coûts qu'engendre l'introduction de nouvelles technologies. L'exclusion épistémologique consiste à rejeter les savoirs et savoir-faire des agriculteur-rices au profit de l'approche scientifique conduite en conditions contrôlées. Enfin, l'exclusion sociologique sous-entend que les agriculteur-rices n'ont pas les capacités d'accéder aux savoirs des académiques ou de les critiquer, et ne peuvent qu'accepter les nouvelles technologies imposées sans les comprendre.

Ces considérations donnent à réfléchir sur la manière d'envisager la collaboration entre les disciplines, et entre scientifiques académiques et praticiens – l'interdisciplinarité étant fortement plébiscitée depuis les années 90 et la recherche co-construite depuis les années 2010 – pour aborder des problèmes complexes tels que les interactions société-environnement. Sans doute est-ce précisément dans cette ouverture à l'Autre que se situe l'apport spécifique des sciences hu-

maines et sociales (SHS), ou plus exactement du couple SHS - écologie.

« L'interdisciplinarité en croisant les regards est une forme de tremplin vers la transdisciplinarité en passant d'une communauté de chercheurs à une communauté de recherche qui intègre une diversité d'acteurs » (Barnaud, 2022). Cela implique de développer une recherche moins animée par une logique d'assimilation et de réduction des différences entre les disciplines que par la reconnaissance de leurs singularités et de leurs objectifs propres. Cela demande aussi un changement de posture que Julien Blanc (2021) explicite avec rigueur, sincérité et sensibilité, dans son souhait de travailler « avec les gens qui font mes terrains et non plus sur eux. Ou, pour être plus juste, de marier les deux : de travailler sur eux pour travailler aussi, et peut-être même avant tout avec eux, c'est-à-dire en quelque sorte également pour eux. [...] Dans cette aventure collaborative, je m'attache à la fois à faire science et recherche ».

Ce chapitre a pour objectif de partager les expériences d'une recherche co-construite qui ont été exprimées lors d'un atelier organisé par CNRS Écologie & Environnement dans le cadre des perspectives d'octobre 2022. Nous décrivons le déroulement de l'atelier pour en extraire les particularismes associés aux recherches co-construites. Si les débats ont longuement souligné les difficultés rencontrées en tant que chercheur-e-s académiques, nous ne resterons pas sans voix pour apporter une diversité de solutions et ainsi faciliter l'engagement des chercheuses et chercheurs pour une recherche engagée et impliquée.

## L'atelier co-construction des savoirs de CNRS Écologie & Environnement : avant, pendant, après

Une soixantaine de personnes a participé à l'atelier, organisé selon cinq « îlots » autour desquels les participants étaient invités à partager leurs expériences, connaissances et questions autour de cinq questions formulées par les organisateurs :

pourquoi co-construire les savoirs ? Quelles sont les responsabilités portées par les acteurs académiques et non-académiques lors du processus de co-construction des savoirs ? Quelles formes de reconnaissance peut-on attendre vis-à-vis des

savoirs produits ? Comment les démarches de co-construction participent-elles à l'éducation scientifique et environnementale ? Quelles sont les transformations du fonctionnement de la recherche académique à mettre en œuvre pour accompagner les démarches de co-construction des savoirs ? Comment peut-on mieux gérer la collecte, l'analyse et le partage des données « citoyennes » ? Ces questions ont été définies par les organisateurs en amont des ateliers, sur la base d'une quinzaine de contributions écrites des participants. Les idées échangées autour de chaque îlot ont été restituées à chaud et discutées par un panel de cinq « témoins » avec une expérience des démarches de co-construction. Nous en proposons ici une synthèse. Il ne s'agit pas d'un travail académique, documenté, références à l'appui. C'est au contraire un instantané de la perception du groupe des participants.

Le public était hétérogène en termes de disciplines et d'expertises dans les démarches de co-construction. On peut y voir un héritage propre à chaque discipline. Pour autant, les problématiques rencontrées étaient partagées par la majorité des participants. Il est notable

qu'il n'y a pas eu de discussion sur la terminologie (recherche co-construite, recherche participative, science citoyenne, recherche action, transdisciplinarité...), et ce, malgré la diversité des profils et des disciplines représentées. Les intervenants ont préféré partager leur expérience et leur ressenti. Malgré la diversité de méthodes mises à l'épreuve par les participants, nous avons observé une convergence des histoires et des trajectoires. Les participants avaient plus envie de partager que de se différencier, en profitant de cet atelier pour se retrouver autour d'enjeux et d'angles communs. Cela témoigne de la maturité des participants ancrés dans cette démarche de recherche, les acteurs n'éprouvant pas le besoin de se définir pour se justifier en se démarquant. Nous notons que les démarches de recherches co-construites sont majoritairement des initiatives individuelles portées par des chercheuses et des chercheurs confirmés qui assument un positionnement impartial, mais non neutre vis-à-vis des savoirs académiques, avec une volonté que « *[leurs] questions de recherche s'inscrivent dans le monde dans lequel nous vivons* ».

### **Développer, formaliser et partager une méthodologie pour la co-construction des savoirs**

**La co-construction des savoirs mobilise des compétences spécifiques et soulève des questions éthiques spécifiques.**

Dans leur diversité, les recherches co-construites impliquent un ensemble hétérogène d'acteurs dont le degré d'expertise peut être très variable, s'agissant de l'objet scientifique étudié ou de la démarche scientifique au sens large. À la différence des recherches interdisciplinaires réalisées entre pairs s'accordant sur une déontologie et une éthique communes de la recherche, les recherches co-construites acceptent une asymétrie dans le rapport aux savoirs entre les différents acteurs. Cela concerne tout autant des savoirs préalables à la recherche que des savoirs produits au cours du processus de recherche. Cette particularité impose de créer un cadre commun consenti par l'ensemble des parties prenantes, et pour

le chercheur, un changement de positionnement dans la hiérarchie des savoirs. C'est une difficulté fréquemment rencontrée par les chercheurs. Les points de blocage portent sur 1) la communication des savoirs co-construits, 2) la production et la gestion des données et, de manière transversale, 3) l'animation de collectifs hétérogènes.

**Les enjeux liés à la communication scientifique portent sur le statut des connaissances académiques et les modalités de leur diffusion.**

Quelle que soit la nature du projet et le degré d'implication des acteurs non-académiques dans la co-construction des questions, des méthodes et des savoirs, il y a un désir légitime de restitution des résultats. Or, la production de savoirs scientifiques prend du temps. De plus, les savoirs produits ne sont pas systématiquement opéra-

tionnalisables – ils ne conduisent pas à une application concrète immédiate – et leur appropriation peut demander un bagage académique conséquent dont tous les partenaires ne disposent pas nécessairement. S'en suit pour les chercheur-e-s une tension quant à la temporalité et la nature des résultats partagés avec les co-chercheur-e-s. Pour paraphraser les propos échangés lors de l'atelier, les questions posées sont « Est-ce que je dois diffuser les résultats préliminaires, au risque qu'ils soient mal interprétés ou utilisés de manière inappropriée ? », ou bien « Mes partenaires doivent-ils être signataires de l'article scientifique alors qu'ils ne sauraient pas le défendre dans sa totalité ? ». Ces questions ne sont pas spécifiques des recherches co-construites, mais elles résonnent particulièrement dans ce contexte.

**Le développement des recherches co-construites impose une réflexion particulière sur le statut et la visibilité des données issues de la recherche.**

Les démarches de co-construction apparaissent comme nécessaires pour aborder certaines questions de recherche en écologie. Par exemple, la mise en œuvre de programmes de conservation de la biodiversité s'appuie en partie sur la reconnaissance et l'intégration des savoirs locaux. Autre exemple, les travaux en écologie urbaine requièrent de mener des observations écologiques dans les espaces privés ; c'est également le cas des recherches en archéologie. Les données acquises par ces biais ont un statut particulier : il peut s'agir de données sensibles (ex. la présence d'espèces rares ou menacées) ou à caractère personnel (ex. propriété foncière, pratiques agricoles ou horticoles, données socioculturelles sur les détenteurs de savoirs). Si les démarches de co-construction s'attachent à définir et s'accordent sur le type de données à collecter et comment, les modalités d'archivage et de partage des données auprès des partenaires académiques et non-académiques de la recherche d'abord, et plus largement ensuite, restent floues et peuvent être conflictuelles. Les participants à l'atelier ont soulevé des difficultés à maîtriser les outils et le cadre juridique entourant la gestion des données de la recherche associée à une démarche de co-construction. Ceci se conjugue avec des préoccupations éthiques : une vigilance que les participants non-académiques à la production de savoirs tirent des bénéfices de leur participation et, à tout le moins, ne soient pas pénalisés par l'utilisation

qui serait faite de ces savoirs (ex. savoirs locaux devenant savoirs universels repris dans la formulation de produits commerciaux, concurrents et destructeurs des savoirs locaux originels...).

**Les recherches co-construites assument une forme d'égalité des participants vis-à-vis des savoirs et interrogent de fait la posture du chercheur.**

Toutefois, cette égalité ne se décrète pas, elle se construit par une acculturation progressive des différentes parties prenantes aux objets, méthodes et contraintes des uns et des autres. Il s'agit de reconnaître et de dépasser un triple clivage avec la société : ontologique, épistémologique et sociologique évoqués en introduction. Les difficultés rencontrées par les chercheur-es impliqué-es dans des démarches de co-construction rejoignent celles inhérentes aux recherches interdisciplinaires, avec une difficulté engendrée par le non-partage *a priori* d'un cadre déontologique et éthique commun par les acteurs impliqués dans une recherche co-construite. Cela implique qu'une étape fondamentale des recherches co-construites consiste en l'établissement de ce cadre commun et est consenti par l'ensemble des acteurs. À ce titre, le mot clé « charte » pour définir les rôles et positionnements des différents acteurs est revenu très fréquemment dans les discussions au cours de l'atelier. Reste que l'établissement d'une telle charte est un exercice difficile avec lequel les chercheurs ne sont pas familiers. Un accompagnement est nécessaire.

**Les difficultés rencontrées par les praticiens des recherches co-construites soulignent le manque d'outils dédiés et de compétences pour les utiliser dans les laboratoires de recherche.**

L'impression assez généralement partagée est que, faute de structuration forte d'une communauté (interdisciplinaire) de praticiens soutenus par l'ensemble des acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche, les initiatives locales peinent à converger vers un ensemble cohérent de dispositifs et d'outils mobilisables par tous. Il en résulte une perte d'efficacité avec un risque d'épuisement des acteurs de bonne volonté. Les besoins exprimés concernent le développement de compétences en termes de facilitation et d'animation de réseaux hétérogènes d'acteurs, de communication scientifique et de gestion des données. Ils concernent à la fois les personnels aca-

démiques, techniques et d'appui à la recherche. L'objectif n'est pas d'identifier une méthode standardisée, mais de mettre à disposition une palette d'outils mobilisables.

### **Le temps est un enjeu central de la co-construction des savoirs.**

Le temps est un enjeu central dans les démarches de co-construction qui se décline lors des différentes phases d'un projet : au moment de son initiation, de sa mise en œuvre et de la restitution des résultats. Tous les praticiens convergent vers le constat qu'il faut (beaucoup) de temps pour établir une relation de confiance entre les différents acteurs d'une recherche co-construite et pour permettre leur acculturation aux différentes disciplines, méthodes et enjeux mobilisés. Plusieurs participants ont également pointé une difficulté à faire coïncider le temps de la recherche – nécessairement long – et le souhait des acteurs non-académiques d'obtenir des retours rapides sur les résultats de leur implication. Enfin, compte tenu de la forte implication des différents acteurs lors de la co-construction d'un projet de recherche, il a été souligné une forme de frustration lorsque la fin de la période d'allocation de crédits de recherche mettait de fait un point final à la collaboration.

Dans leur ensemble, les participants à l'atelier ont souligné l'inadéquation entre les modalités actuelles de financement de la recherche au travers de projets à court terme et la nécessité du temps long des démarches de co-construction. Les chercheurs qui assument de « prendre le temps de la co-construction » évoquent également un effet potentiellement délétère sur leurs évaluations individuelles.

Bien que le terme n'ait pas été prononcé formellement lors de la synthèse des discussions, il y a un parallèle notable à faire avec le mouvement « *slow science* » initié en Allemagne par *The Slow Science Academy* en 2010 ([slow-science.org](http://slow-science.org)), puis introduit en milieu francophone par Olivier Gosselain (2011) et Isabelle Stengers (2013) en réaction à la surproduction d'articles scientifiques (Malcolm, 1996), à l'accélération et à la désynchronisation entre les plus rapides et les plus lents (Coutellec, 2015). Ce rythme effréné et l'ampleur des projets financés (type Horizon 2020, ANR, ERC...) distancient les scientifiques et leur terrain – qu'il s'agisse des personnes enquêtées ou des sites étudiés. Les acteurs non-académiques sont

confrontés à des documents administratifs souvent abscons (autorisation de recherche, permis éthique...) susceptibles de déshumaniser les relations en remplaçant les liens de confiance par le cadre juridique. Ils doivent de plus accueillir un nombre grandissant d'étudiants ou de jeunes chercheurs non permanents (Demeulenaere et al., 2018) de sorte qu'à peine des liens dépassant le strict cadre juridique sont-ils créés qu'une nouvelle personne reprend la suite.

### **En résumé, pour réussir au mieux une recherche co-construite, plusieurs étapes sont nécessaires :**

- reconnaître les compétences (rôles et fonctions), souvent complémentaires, de chaque partenaire, qu'il soit chercheur ou praticien ;
- reconnaître les contraintes et intérêts globaux propres à chaque discipline et entre chaque groupe social impliqué dans la recherche (scientifiques, ONG, agriculteurs...);
- reconnaître les méthodes et le temps de recherche et d'application des différents partenaires (scientifiques, ONG, gouvernement...);
- négocier dans une sorte de va-et-vient, tout le long du processus de recherche, les enjeux, objectifs et méthodes engagées et l'interprétation et l'utilisation des résultats de la recherche ;
- comprendre et intégrer dans les projets de recherche les ontologies locales, c'est-à-dire les multiples manières d'être en relation avec le monde (incluant humains et non-humains), et admettre que les systèmes de savoirs sont dynamiques et interpénétrés ;
- comprendre les relations de pouvoir et d'intérêt entre les différents acteurs de la recherche co-construite ;
- accepter de prendre le temps.

Pour synthétiser ces points, nous nous sommes en partie inspirés du cours donné par Frédérique Jankowski (anthropologue, CIRAD, UMR SENS) donné dans le cadre du module « Ethnoécologie : interactions bioculturelles », master BEE de l'Université de Montpellier.

## Évaluer les recherches co-construites et leurs effets sur les différentes parties prenantes et la société

La problématique de l'évaluation des recherches co-construites et de leur impact implique de répondre à la question « Pourquoi faire des recherches participatives ? » Il existe deux types de réponses à cette question, qui sont souvent en tension.

### Les recherches participatives sont une méthode appropriée pour réaliser certains projets de recherche.

Le porteur choisit de s'engager dans cette voie car il pense pouvoir faire une recherche de meilleure qualité qu'avec des méthodes sans participation. Efficacité et pertinence en termes de créativité sont les principaux arguments. Cela peut apparaître comme nécessaire (on ne s'engage pas dans des recherches co-construites sans en attendre une plus-value pour la recherche) et suffisant (il n'y a pas besoin d'autres arguments pour justifier de faire de telles recherches). Dans ce cadre, le chercheur adopte une posture de recherche pragmatique, en mobilisant des outils dans un objectif individuel (centré sur sa recherche) pour améliorer la qualité de la recherche produite. Dans cette logique, les recherches co-construites n'ont pas besoin de dispositif d'évaluation spécifique.

### La recherche co-construite a des effets supplémentaires à la seule qualité de la recherche produite, qu'il convient d'explicitier, reconnaître et évaluer.

Il peut s'agir notamment de répondre à une demande sociale pour participer à la vie de la cité (ici, la recherche, comme bien commun qui doit permettre la participation de non professionnels de la recherche). Plus généralement, la co-construction peut être mobilisée quand, dans un projet, les effets de la recherche (sur la société) sont prioritaires sur la qualité de la recherche elle-même (par exemple, mesurée par les publications). Cet objectif collectif demande alors une transformation constitutive du projet de la recherche, l'absence de/ou la réticence à la co-construction étant alors considérées comme un problème en soi qu'il faut résoudre. Ce type d'engagement dans un processus de recherche co-construite nécessite des formes d'évaluation

spécifiques pour les effets sur la société, sur les participant-e-s et sur les parties prenantes. En somme, la recherche co-construite serait à la fois de la recherche, et plus que de la recherche, et il conviendrait d'évaluer ce « plus ».

Ce « plus » pourrait correspondre au dépassement de ce que Gaston Bachelard (1938) a conceptualisé comme un « obstacle épistémologique ». L'esprit ayant « l'âge de ses préjugés », « accéder à la science, c'est, spirituellement, *rajeunir, c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé* » en effaçant ses préjugés. La co-construction des savoirs, en permettant l'élaboration d'une science « ouverte et dynamique », la rend capable de s'enrichir de nouvelles connaissances jusque-là camouflées par l'obstacle. Elle permet alors non seulement de répondre à des questions préalablement posées, mais surtout d'en créer de nouvelles. Bien que Gaston Bachelard fasse explicitement référence au couple professeur/élève, l'idée du renversement des « obstacles déjà amoncelés par la vie quotidienne » peut s'élargir aux interactions entre chercheuse et chercheur académiques et partenaires non-académiques, en admettant que les obstacles soient présents chez les deux. Ce n'est que par une double prise de conscience de ces obstacles et par la valorisation de leurs connaissances respectives qu'une réelle communication pourra faire émerger des solutions innovantes et adaptées. L'évaluation des recherches co-construites doit donc se pencher à la fois sur les transformations qu'elles engendrent chez les partenaires non-académiques et dans la communauté des chercheuses et chercheurs académiques.

Il existe ainsi une tension entre un projet individuel de recherche co-construite porté par des objectifs académiques classiques et un projet collectif qui a pour ambition de répondre à des objectifs sociétaux. Dans les deux cas, le chercheur impliqué devra trouver sa place académique. Ils sont en effet régulièrement amenés à devenir (parfois à leur insu) traducteurs des normes des uns et porte-parole des autres, à l'instar de certains chercheurs en sciences humaines et sociales dans les projets interdisciplinaires (Marié & Tamisier, 1982). Les scien-



tifiques de projets co-construits, peuvent-ils se satisfaire de ce rôle de « facilitation », au risque de cautionner une instrumentalisation de leur discipline par les projets qui les emploient et

de perdre de vue leur contribution aux questions théoriques qui animent leur propre champ disciplinaire ?

## Vers une communauté de recherche reconnue et structurée

La communauté de recherche ayant ou voulant développer une recherche co-construite a vu un signal fort de la part de CNRS Écologie & Environnement en organisant un atelier sur ce thème dans le cadre de prospectives. Lors de l'atelier, les participants ont fait remonter plusieurs propositions afin de pouvoir réaliser une recherche de qualité et cohérente avec les valeurs de la co-construction.

### En quête de dispositifs de financement adaptés au format des recherches co-construites

Écrire un projet de recherche pour un financement implique d'avoir une question de recherche et des hypothèses à tester sur un objet, un terrain déjà défini. Or, pour pouvoir faire émerger « *des questions qui s'inscrivent dans le monde que nous vivons* », il est nécessaire de prendre le temps de les identifier avec des acteurs non-académiques. Ce temps est actuellement prélevé « en silence », hors projet, en amont des projets. Les participants de l'atelier aimeraient que ce temps soit reconnu et puisse être officiellement intégré au processus de recherche. Cela peut se faire soit par le financement de projets d'amorçage qui déboucheront sur des demandes de financement classiques, soit sur des appels à projets qui permettent des financements par tranches conditionnelles les unes aux autres, le succès d'une tranche garantissant le financement de la suivante sans avoir besoin de préciser toutes les tranches au moment du dépôt initial. Cela pallierait à une autre limite, celle de la durée trop brève des projets financés. Lors de ces projets, il se joue autre chose que de la production académique brute ; le tissage de relations fondées sur la confiance mutuelle ne peut avoir comme limite temporelle la fin du projet. Il serait intéressant de créer des appels à projets de continuité, qui per-

mettent de garder le lien et ainsi potentiellement de rebondir sur de nouvelles questions d'intérêt pour la recherche et la société.

### Création d'espaces d'échange

Des groupes de recherche (Réseaux thématiques) existent déjà au CNRS. Les participants de l'atelier demandent néanmoins la création de groupes de recherche multi-instituts, sans étiquettes institutionnelle et disciplinaire pour structurer une communauté de praticiens des recherches co-construites en les aidant à suivre l'évolution des pratiques dans ce domaine. Dans ces espaces de dialogue, incluant autant que possible académiques et non-académiques, les participants pourraient avancer conjointement en échangeant sur leurs expériences de la co-construction. L'objectif serait d'extraire un code de conduite ou un code d'éthique rappelant les valeurs fortes de la co-construction.

Afin de donner un contexte inter-institutionnel à cette initiative, il a été proposé de créer une fondation pour la recherche co-construite (FRC) à l'image de la fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB). Cette fondation aurait ainsi une visibilité nationale et internationale en soutenant et mettant en valeur les multiples initiatives françaises.

### Recrutement de jeunes chercheuses et chercheurs impliqués dans la co-construction

Nous avons remarqué un rajeunissement de l'entrée des scientifiques dans un processus de co-construction. Certains enseignants et enseignantes de masters (Université de Montpellier, MNHN...) enseignent l'importance de ces démarches, en particulier sur des sujets environnementaux. Il faudrait poursuivre ces efforts et

intégrer la problématique de la co-construction des savoirs aux formations niveau master et doctorat, notamment sous l'impulsion des missions « Science avec et pour la société » au sein des établissements d'enseignement supérieur.

Malgré le peu de formation, certains doctorants s'aventurent sur cette voie, souvent par conviction. Cependant ces démarches sont très compliquées à mettre en œuvre dans des thèses devant se dérouler en trois ans. Mener de front un travail de terrain, couplé à une approche inter- et transdisciplinaire, est impossible en trois ans ; la durée des thèses doit être rallongée. Les formes de restitutions sont difficiles à évaluer. La difficulté de changer sa manière de travailler après des années de recherche académique a également été discutée. Une recherche co-construite implique de transformer plus que de simples sujets ou de questions ; cela implique de changer de posture et d'accepter de s'engager plus immersivement dans le processus de recherche. Ce type de démarche implique de s'affranchir d'un formatage académique, de s'inscrire dans une famille disciplinaire et de se sentir reconnu à travers des formes classiques d'évaluation comme une exigence académique de publication. Un chercheur, libéré de ces critères dès sa formation universitaire, sera plus à même d'être créatif dans sa recherche et respectueux des autres formes de savoirs. Afin d'intégrer ces profils, nous plaçons pour la création d'une commission de recrutement dédiée à la co-construction comme cela a été fait pour les commissions interdisciplinaires

au CNRS dès 2002 (avec intégration des SHS en 2004, Joulain *et al.* 2005), et en 2020 à l'IRD.

Les recherches co-construites ont besoin d'autres types de métier que des chercheurs. Ils ne peuvent absorber toutes les compétences nécessaires, en particulier dans les domaines du juridique et de la médiation. Nous pensons que ces interstices peuvent être occupés par des personnes-liens, comme dans le cadre du programme « Vigie Nature » dans lequel a été créé une quinzaine de postes d'ingénieurs pour gérer la plateforme. Ces compétences permettraient de consolider les liens avec les partenaires associatifs (LPO, Telabotanica, Noé...).

#### **Adapter les critères d'évaluation des scientifiques**

Dans une recherche co-construite, il est important de reconnaître et valoriser la contribution des acteurs non-académiques de manière juste et inclusive. Ces formes de valorisation restent à inventer. Il serait plus cohérent et juste, d'associer des modalités d'évaluation collective à même de reconnaître des formes de production collective de connaissances. Pour cela, nous proposons de soutenir des initiatives innovantes de production et de diffusion des méthodes plutôt que les seuls résultats et de faire évoluer les métiers de médiation. Nous notons avec optimisme que CNRS Sciences humaines & sociales a ajouté une nouvelle rubrique intitulée « Initiatives de recherche participative » au dossier d'évaluation annuel des chercheurs SHS au CNRS.

## Messages clés

Pour mener une recherche co-construite de qualité, nous militons pour une reconnaissance précoce de ce type de recherches grâce à :

- la mise en place de modes d'évaluations individuelle et collective, au niveau national et international ;
- la reconnaissance matérielle et immatérielle du rôle des partenaires non-académiques ;
- des innovations dans les modes de diffusion des résultats ;
- l'adaptation de financements intégrant le temps long (avant et après projet) ;
- une formation universitaire et un recrutement intégrant les concepts et respectant la temporalité de la co-construction ;
- une meilleure coopération inter-organismes de recherche.

Nous croyons une réconciliation possible entre les objectifs individuels et collectifs de la recherche académique à travers des programmes de recherches co-construites.

## RÉFÉRENCES

- Bachelard, G. (1999 [1938]). La formation de l'esprit scientifique. Librairie philosophique J. Vrin.
- Barnaud, A. (2022). «Regards croisés sur l'agrobiodiversité pour une transition agroécologique, durable, juste et équitable.» Habilitation à Diriger les Recherches en Evolution.
- Blanc, J. (2021). «Faire face à la crise écologique : l'ethnoécologie comme pratique de connaissance engagée.» *Revue d'ethnoécologie*, 20. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.8741>.
- Demeulenaere, É., Rivière, P., Hyacinthe, A., Baltassat, R., Baltazar, S., Gascuel, J.-S., Lacanette, J., et al. (2017). «Dossier : Des recherches participatives dans la production des savoirs liés à l'environnement – La sélection participative à l'épreuve du changement d'échelle. À propos d'une collaboration entre paysans sélectionneurs et généticiens de terrain.» *Natures Sciences Sociétés*, 25(4), 336-346. <https://doi.org/10.1051/nss/2018012>.
- Joulian, F., de Cheveigné, S., & Le Marec, J. (2005). «Dossier Interdisciplinarité "Évaluer les pratiques interdisciplinaires".» *Natures Sciences Sociétés*, 13(3), 284-290. <https://doi.org/10.1051/nss:2005043>.
- Shiva, V. (1993). *Monocultures of the mind. Perspectives on biodiversity and biotechnology.* Zed book and Third world network.
- Shiva, V. (1996). «Agricultural biodiversity, intellectual property rights, and farmers' rights.» *Economic and Political Weekly*, June, 1621-1631.

## GLOSSAIRE

**3Rs** : Remplacer, réduire, raffiner. Il s'agit des trois termes constituant les piliers de l'éthique autour de l'utilisation de l'animal en recherche.

**AMAP** : Arctic monitoring and assessment programme

**AnaEE-France** : Analyses et expérimentations sur les écosystèmes – France

**ANRS-MIE** : Agence autonome de l'Inserm qui a pour mission de coordonner et financer la recherche française sur ces maladies infectieuses émergentes et ré-émergentes

**ANR** : Acide ribonucléique

**ANF** : Actions nationales de formation

**APC** : Article processing charges

**BBEES** : Base de données biodiversité, écologie, environnement et sociétés

**CITES** : Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction

**CMIP** : Programme d'intercomparaison des modèles de climat

**CSIT** : Commission spécialisée instrumentation innovante transverses

**DEPHY** : réseau d'agriculteurs engagés volontairement à réduire l'usage des produits phytopharmaceutiques (dits « phytos ») dans leurs exploitations tout en maintenant leurs performances économiques, sociales et environnementales.

**Dictionnaire des données** : collection de métadonnées ou de données de référence nécessaire à la conception d'une base de données

**DIPEE** : Dispositifs de partenariat en écologie et environnement

**DIRSU** : Direction de la sûreté

**DOAJ** : Directory of open access journals

**EBVs** : Essential biodiversity variables

**ERE** : Evaluation du risque environnemental

**EOSC** : European open science cloud

**eLTER PPP** : European Long-Term Ecological Research preparatory phase project

**eLTER PLUS** : European Long-Term Ecological Research advanced community project

**Entrepôt de données** : un entrepôt de données de recherche est une application destinée à accueillir, conserver, rendre visibles et accessibles des données de recherche.

**EVR** : Environnement virtuel de recherche (virtual research environment, VRE en anglais). Plateforme de travail collaborative, incluant l'hébergement de fichiers/ressources, des outils spécifiques à la discipline.

**FAIR** : Findable, accessible, interoperable, reusable. Ensemble de principes directeurs pour gérer les données de la recherche visant à les rendre faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables par l'homme et la machine (Wilkinson et al., 2016).

**GBIF** : Global biodiversity information facility

**GDR** : Groupement de recherche

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

**GxE** : Gene-environment interactions

**IPBES** : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques

**IPEV** : Institut polaire français Paul-Emile Victor

**IR** : Infrastructure de recherche. Installation fournissant des ressources et des services qui sont utilisés par les communautés de recherche pour mener leurs travaux

**IRN** : International research network

**JEVI** : Réseau de gestionnaires de jardin, espaces végétalisés et infrastructures pour la réduction de l'usage des produits phytosanitaires et la diffusion de bonnes pratiques de gestion du patrimoine végétal

**LabEx DRIIHM** : Laboratoire d'excellence, dispositif de recherche interdisciplinaire sur les interactions hommes-milieux

**Lac de données** (en anglais *data lake*) : espace de stockage de données massives et hétérogènes, conservées dans leurs formats originaux ou très peu transformées dans un premier temps, la priorité étant donnée au stockage rapide

**LTER** : Long term ecological research

**LTSER** : Long term socio-ecological research

**Mie** : Maladies infectieuses et émergentes

**MITI** : Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires

**MSH** : Maison des sciences de l'Homme

**Modèles TKTD** : Modèles toxicocinétiques-toxicodynamiques

**NGS** : Next-generation sequencing

**OBIS** : Ocean biodiversity information system

**OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques

**OHM** : Observatoires hommes-milieux

**Ontologie** : Ensemble structuré de concepts permettant de donner un sens aux informations

**OSU** : Observatoires des sciences de l'univers

**PAC** : Politique agricole commune

## GLOSSAIRE

**PEPR** : Programmes et équipements prioritaires de recherche

**PEPR PREZODE** : Programmes et équipements prioritaires de recherche - Preventing zoonotic diseases emergence. Programme de recherche de France 2030, Changements globaux, pratiques humaines et émergence de maladies zoonotiques

**PEPS** : Projets exploratoires premier soutien

**PGD** : Plan de gestion des données (data management plan, DMP en anglais). Document qui explicite la manière dont sont obtenues et traitées les données tout au long de leur cycle de vie, de la collecte à l'archivage

**PMIP** : Programme paleoclimate modelling intercomparaison project

**PNDP** : Pôle national de données de biodiversité

**PID** : Persistant identifier. Chaîne de caractères alphanumériques qui désigne une ressource

**PIREN** : Programme interdisciplinaire de recherches sur l'environnement

**RECOTOX** : initiative de recherche en écotoxicologie pour suivre, comprendre et réduire les impacts des pesticides socio-agro-écosystèmes

**RGPD** : Règlement général sur la protection des données

**RR** : Registered reports

**SHS** : Sciences humaines et sociales

**SIST** : Séries interopérables et systèmes de traitements. Réseau technologique pluri institutionnel des gestionnaires de données d'observation (domaines Terre solide et interfaces continentales, océan, atmosphère, univers).

**SWIR** : Short wave infrared (infrarouge court)

**Thésaurus** : liste organisée de termes normalisés, validés, reliés par des relations sémantiques (équivalence, hiérarchie, association, synonymie...) exprimées grâce à des signes conventionnels.

**UICN** : Union internationale pour la conservation de la nature

**WGS** : Whole-genome shotgun

**ZA** : Zones ateliers

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023



**annexes**

# INFRASTRUCTURES ET DISPOSITIFS INEE DÉDIÉS À L'ÉTUDE DES (SOCIO)-ÉCOSYSTÈMES

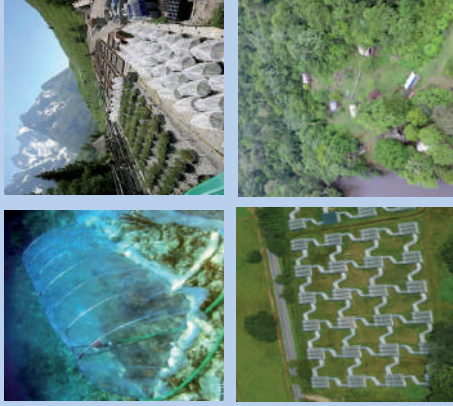
**Espace** ...de quelques dm<sup>3</sup> à un bassin versant...



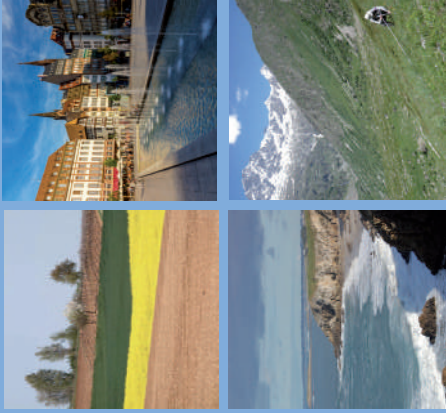
Dispositifs expérimentaux instrumentés sur des écosystèmes confinés en conditions contrôlées



Structures de recherche pluridisciplinaires de long terme au cœur d'écosystèmes sensibles



Recherches inter et transdisciplinaires sur l'environnement & les socio-écosystèmes



Études d'un cadre socio-écologique perturbé par un événement anthropique majeur



Niveaux  
d'anthropisation

**Temps** ...de quelques semaines à plusieurs dizaines d'années...





# ÉCOTRONS

DES DISPOSITIFS INNOVANTS POUR LA RECHERCHE EN ÉCOLOGIE

Les écotrons français sont actuellement les outils les plus instrumentés permettant des expérimentations complexes et hautement contrôlées pour comprendre, modéliser et prévoir le fonctionnement des écosystèmes terrestre et aquatique et de leur biodiversité en réponse aux changements climatiques et anthropiques



## DES GRANDS INSTRUMENTS DÉDIÉS AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX



Des chercheurs expérimentent dans une des enceintes de l'Écotron européen de Montpellier

### PRINCIPE

L'expérimentation sur les écosystèmes est un enjeu scientifique de premier plan qui demande de maîtriser la dynamique de systèmes complexes et adaptatifs, et de mesurer et contrôler les paramètres physico-chimiques et biologiques associés. Ainsi, le principe des écotrons est de confiner des écosystèmes terrestres ou aquatiques, continentaux ou marins, dans des enceintes totalement ou partiellement étanches, aptes à générer une gamme de conditions physiques et chimiques strictement contrôlées, et de simuler des scénarios climatiques tels que ceux prédits par le GIEC.

### CONTEXTE NATIONAL ET INTERNATIONAL

Les Écotrons sont partenaires du projet d'infrastructure Européenne AnaEE (Analysis and Experimentation on Ecosystems) et de sa composante française AnaEE-France, infrastructure nationale en biologie et santé. Les Écotrons sont soutenus par le Programme des Investissements d'Avenir, les Conseils régionaux Languedoc-Roussillon et Ile-de-France, les fonds structurels Européens FEDER et les Très Grandes Infrastructures de Recherche du CNRS.

### MISSION ET ACCÈS

Leur mission est de fournir à la communauté scientifique des dispositifs expérimentaux technologiquement avancés et originaux permettant de faire progresser la compréhension du fonctionnement des écosystèmes en testant et en développant théories et modèles. Ces dispositifs sont caractérisés par un grand nombre d'enceintes expérimentales, de niveaux de contrôle environnemental variés, équipées et instrumentées, permettant d'étudier statistiquement l'interaction entre facteurs environnementaux. Les six plateformes des écotrons sont ouvertes à des équipes nationales et internationales, sous condition de respecter la charte des utilisateurs disponible en ligne.

### MESURES EN LIGNE ET BASES DE DONNÉES

Des mesures de processus, associées aux mesures des conditions environnementales, sont mises en place dans les deux Écotrons. Les chercheurs ont accès à ces données en temps réel au travers d'une interface Web.

### INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Certains des concepts technologiques des écotrons sont protégées par des brevets européens en partenariat avec des entreprises privées.



Lac artificiel de la plateforme PLANAQUA au CEREEP

Institut écologie et environnement du CNRS

[www.cnrs.fr/inee](http://www.cnrs.fr/inee)



### CONTACTS ET ADRESSES

Écotron européen de Montpellier  
UAR 3248

1 chemin du Rioux  
Campus de Baillarguet  
34980 Montferrier-sur-Lez



[www.ecotron.cnrs.fr](http://www.ecotron.cnrs.fr)

Écotron Ile de France  
UAR 3194

78 rue du château  
77140 Saint-Pierre-lès-Nemours





## LOCALISATION



© Jacques ROY/CNRS Images

L'écotron européen de Montpellier est situé sur le campus de Baillarguet. Dans ses plateformes, les mesures d'échanges gazeux sont réalisées en ligne (évapotranspiration, flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) et les mesures des isotopologues <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub>, <sup>15</sup>N-N<sub>2</sub>O, <sup>18</sup>O-CO<sub>2</sub>, <sup>18</sup>O-H<sub>2</sub>O, <sup>17</sup>O-H<sub>2</sub>O, <sup>2</sup>H-H<sub>2</sub>O permettent l'étude de processus supplémentaires.

## PLATEFORME ISOFLUX

La plate-forme Flux biogéochimiques et isotopes est une plateforme d'analyse de gaz dont le fonctionnement est transverse aux trois plateformes expérimentales. Elle permet l'acquisition de mesures en ligne et continues (on-line), lorsqu'elle est couplée à une plateforme expérimentale, ainsi que des mesures indépendantes lorsque l'échantillonnage est réalisé sur flasques ou exetainer.

## MICROCOSMESTERRESTRES

Cette plateforme est constituée de treize enceintes de culture (1 m x 1 m x 1,5 m) pouvant abriter plusieurs dizaines de microcosmes chacune. Ces enceintes de culture ont un éclairage interchangeable : lampes à plasma avec un spectre similaire à celui du soleil, ou LED avec une composition spectrale modulable. Les conditions climatiques, la teneur en CO<sub>2</sub> pré- ou post- industrielle, et le δ<sup>13</sup>C de ce gaz sont contrôlés.



© Jacques ROY

Les chambres de culture de la plateforme Microcosmes. Les bouteilles de gaz sont nécessaires aux marquages et mesures isotopiques.

## MÉSOCOSMES TERRESTRES

Cette plateforme offre seize enceintes expérimentales avec des lysimètres de taille modulable (jusqu'à 1 m<sup>2</sup> de surface et 1 m de profondeur de sol) et une enceinte de canopée jusqu'à 1,8 m de hauteur. Les conditions climatiques (lumière naturelle ou contrôlée, températures positives et négatives, humidité) et la teneur en CO<sub>2</sub> (pré- ou post-industrielle) sont contrôlées. Un marquage <sup>13</sup>C continu de la matière organique est réalisé.

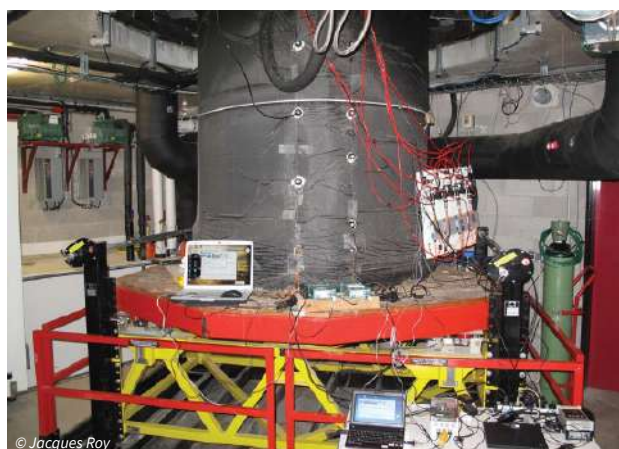


© Alexandru Milcu

Vue du bloc expérimental 1 du plateau Mésocosmes composé de 18 unités expérimentales

## MACROCOSMES TERRESTRES

Constitués de douze enceintes de 30 m<sup>3</sup>, ils peuvent accueillir des monolithes de sol de 2 à 15 tonnes. Les conditions climatiques (température, humidité) et la chimie atmosphérique (CO<sub>2</sub>, <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub>) sont contrôlables dans chaque enceinte de manière indépendante. Le réalisme des conditions expérimentales a été recherché à travers un éclairage naturel avec peu de réduction des UV. Les températures du sol et de l'air sont contrôlables de manière indépendante. Il est possible d'utiliser des écosystèmes intacts prélevés in natura.



© Jacques Roy

Mesure du quotient respiratoire (CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>) du sol dans un lysimètre souterrain d'un macrocosme terrestre. La table élévatrice rouge et jaune mesure par pesée l'évapotranspiration de l'écosystème.

## LOCALISATION



Le CEREEP-Écotron IleDeFrance, Centre de Recherche en Écologie Expérimentale et Prédicative, est établi sur le site de Foljuif (Seine-et-Marne) de l'École normale supérieure. Cette Unité Mixte de Services entre le CNRS et l'ENS propose une instrumentation dédiée à la mesure continue du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques.

## MÉSOCOSMES ÉCOLAB

Les systèmes écolab sont des simulateurs de climats et d'environnements atmosphériques. Ces systèmes permettent de reproduire environ 90% des climats continentaux actuels sur terre, mais aussi des climats passés et des projections et des scénarios futurs. Plus de 25 paramètres climatiques au sens large sont interopérables individuellement, avec des modifications possible toutes les 5 minutes. Il est ainsi possible de reproduire des climats réels en quasi continu. Chaque système est constitué de trois enceintes environnementales identiques installées autour d'un laboratoire. Chaque enceinte autorise le confinement de petits écosystèmes modèles terrestres ou aquatiques de l'ordre du m<sup>3</sup> dans des conditions parfaitement contrôlées et isolées. Ce haut niveau de contrôle permet la réplication des expériences dans le temps ou entre enceintes. Quinze enceintes sont actuellement disponibles. Certaines de ces enceintes permettent la manipulation de paramètres spécifiques comme l'ozone ou les isotopes stables marqués, par exemple.



*Scientifique examinant l'électronique régulant les conditions climatiques (température, hygrométrie, etc.) d'une chambre environnementale d'un système Ecolab, simulateur environnemental dédié à l'expérimentation en écologie.*

## ECOTUBES

Les écotubes sont une déclinaison « gros volume » des écolabs. Avec plus de 100 m<sup>3</sup> de volume par cellule, ce sont actuellement les systèmes « écotron » les plus grands du monde. D'une hauteur de 4 m utile, ils permettent d'accueillir des arbres de petite taille, ou des colonnes d'eau marine. De la même manière que les systèmes écolabs, l'ensemble des conditions sont artificielles et opérables individuellement à un pas de temps de 5 minutes. Les capacités en terme de paramètres (température, humidité) sont moindre que dans les écolabs.



## MICROCOSMES AQUATIQUES

L'Écotron IleDeFrance accueille des microcosmes aquatiques sous forme de dizaines d'enceintes de quelques litres. Ces unités permettent de confiner des bactéries, du phytoplancton et du zooplancton, afin d'étudier l'impact des changements environnementaux sur la biodiversité et le fonctionnement des communautés de micro-organismes aquatiques. Elles sont conçues spécifiquement pour permettre l'étude du cycle du carbone et acceptent des écosystèmes d'eau douce ou marine.



*Systèmes de chémstats en laboratoire qui permettent d'élever microalgues et zooplancton simultanément ou séparément en culture continue avec contrôle de la température, de la lumière et de la pCO<sub>2</sub>.*



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Grenoble et Col du Lautaret (à 2 100 m)  
Coordonnées GPS : 45°02 N - 6°24 E

## DATE DE CRÉATION

1899 Jardin alpin du Lautaret - 2005 Station alpine Joseph Fourier

## CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENJEUX

Le fonctionnement des écosystèmes de montagne demeure peu connu par rapport à celui des écosystèmes de plaine, alors que les milieux alpins sont particulièrement exposés aux changements du climat et de l'agriculture. Les milieux arctiques et d'autres montagnes ont été dotés depuis longtemps de stations d'écologie expérimentale, mais les Alpes ne disposaient pas d'un tel outil. La station alpine Joseph Fourier permet la réalisation de recherches en écologie végétale et en écologie fonctionnelle des écosystèmes alpins. Elle participe à la formation des étudiants et à la diffusion des connaissances (15 000 à 20 000 visiteurs/saison pour le jardin alpin).



## SERVICES

Les services offerts se répartissent entre des espaces expérimentaux *in situ* et une plateforme analytique située à proximité immédiate. En extérieur, les services offerts se répartissent entre espaces d'expérimentations, collections botaniques et systèmes d'observations des conditions environnementales d'altitude. Ils comprennent :

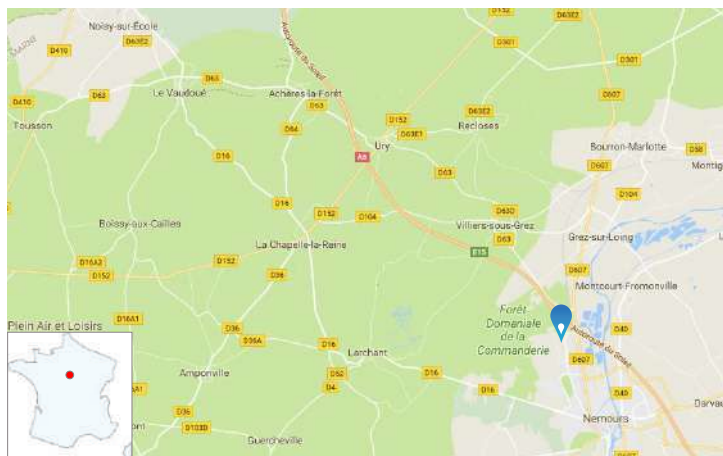
- des parcelles de prairies subalpines,
- des zones expérimentales (250 m<sup>2</sup>) de cultures semi-contrôlées,
- un arboretum d'altitude,
- une station météo,
- une tour à flux sur prairie subalpine.

La SAJF comprend des laboratoires couvrant un large spectre (étude des organismes de montagne, des écosystèmes et du climat). Plusieurs bases de données sont disponibles (séries chronologiques de variables climatiques, microclimat, données haute résolution de télédétection). D'une capacité d'hébergement de 25 lits, la station est ouverte toute l'année, permettant un accès unique aux écosystèmes enneigés de haute altitude. Elle dispose d'une expertise botanique, horticole et en écologie des écosystèmes alpins. Incluse dans la Zone Atelier Alpes, sa relation avec les gestionnaires d'espaces protégés facilite la mise en place de recherches *in situ*. La salle de conférence de la Galerie de l'Alpe dispose de 70 places.

## ACCÈS AUX SERVICES

La plateforme expérimentale est ouverte aux laboratoires français et étrangers, après validation des projets par un comité scientifique local. Le jardin botanique alpin est ouvert au public entre juin et septembre.

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Saint-Pierre-lès-Nemours, Ile-de-France  
N 48°17' 14.48" E 2° 40' 34.64"

## DATE DE CRÉATION

Situé au sein de la station biologique de Foljuif fondée par l'Ecole normale supérieure à la fin des années 1960, le Centre de Recherche en Ecologie Expérimentale et Prédictive a été créé au 1<sup>er</sup> janvier 2008.

## CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENJEUX

Le CEREEP est dédié à l'expérimentation écologique sur les organismes et les écosystèmes des milieux continentaux aquatiques et terrestres. Les approches expérimentales proposées aux utilisateurs sont intégratives, du gène à l'écosystème, et permettent d'aborder des questions allant de l'écologie à l'évolution. Le centre propose un ensemble de plateaux techniques dédiés à l'étude expérimentale le long de gradients de contrôle, de confinement et de complexité écologique. Ces plateaux sont associés à des moyens techniques pour la recherche à l'échelle de l'organisme, de la production animale et végétale, et de l'analyse sous la forme d'animaleries, d'instruments de mesure et d'espaces de laboratoire.



## SERVICES

Le CEREEP met à disposition des utilisateurs six plateaux techniques :

- volières et laboratoires dédiés,
- macrocosmes terrestres composés de 35 enclos de 100 m<sup>2</sup> chacun associés à une animalerie et un laboratoire,
- une serre de 540 m<sup>2</sup> composée d'un hall technique et de deux chapelles de 200 m<sup>2</sup> pour la recherche et la production végétale,
- les deux plateaux de l'Equipement d'excellence « Plateforme nationale expérimentale en écologie aquatique » (PLANAQUA) comprenant des dizaines de mésocosmes de plusieurs m<sup>3</sup> et un dispositif unique de 16 lacs artificiels de 750 m<sup>3</sup>. Cet équipement dispose d'une animalerie poissons dédiée, d'un laboratoire et d'un parc d'instrumentation,
- 34 ha de prairies et 44 ha de forêts pour des programmes d'expérimentation sur le long terme,
- un réfectoire, une salle de conférence et 30 lits permettent d'accueillir chercheurs et colloques.

## ACCÈS AUX SERVICES

Le centre est ouvert aux chercheurs et industriels via un portail d'accès de l'infrastructure nationale AnaEE. Les équipes accueillies bénéficient d'espaces de travail, d'un accès aux services communs, de l'appui du personnel technique, et des facilités d'hébergement. Ces services sont facturés et des conditions de propriété intellectuelle s'adaptent aux projets accueillis.

## INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Le centre participe au développement d'équipements et d'instruments innovants en partenariat avec des industriels français et a obtenu quatre brevets européens depuis 2008.



### LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Regina, Guyane française  
Coordonnées : 4.087755 N - 52.680153 W (site Inselberg)  
4.037748 N - 52.672724 W (site Pararé)

### DATE DE CRÉATION

Octobre 1986

### CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENJEUX

La station de recherche des Nouragues est située au cœur de la forêt tropicale de Guyane française, dans un habitat aussi éloigné que possible de l'influence directe des activités humaines. Ce lieu privilégié est propice à l'étude du fonctionnement écologique des forêts tropicales et de la biodiversité qu'elles hébergent. La station accompagne des projets de recherche novateurs de disciplines variées en accueillant des équipes nationales et internationales. Il fait partie des réseaux d'observation à long terme des écosystèmes amazoniens qui contribuent à une meilleure compréhension de la réponse des forêts tropicales aux changements climatiques.

#### Deux camps ont été aménagés à 8 km l'un de l'autre :

- Le site Inselberg porte le nom d'une colline géologique granitique située à proximité du site. Ce site est le plus éloigné de l'activité humaine et est adapté à l'étude des communautés de singes, oiseaux, et plantes forestières.
- Le site Pararé est localisé près de la rivière Arataye. Il est idéal pour l'étude physique et biologique des rivières et des forêts riveraines. Les deux sites sont intégrés à un espace de 9 000 ha dédié à la recherche, au cœur de la Réserve Naturelle des Nouragues.



### SERVICES

Chaque site a une capacité d'accueil d'environ 20 personnes. Les sites sont alimentés en énergie photovoltaïque et/ou hydroélectrique. L'hébergement en carbets et en hamacs est adapté aux spécificités du milieu. Une connexion internet est fournie par satellite. Les infrastructures comprennent une salle climatisée avec des paillasses et un espace de laboratoire ouvert. Du matériel scientifique est mis à disposition : loupe binoculaire, microscope, balance de précision et étuve. L'équipe de la station peut également fournir et accompagner au déploiement d'équipements spécifiques : drone, lidar terrestre, enregistreurs acoustiques, caméra-pièges et matériel pour grimper en canopée. Des stations météorologiques enregistrent en continu la température, l'hygrométrie, les précipitations et l'irradiation solaire. L'accès à la forêt est facilité par la présence de layons entretenus et balisés.

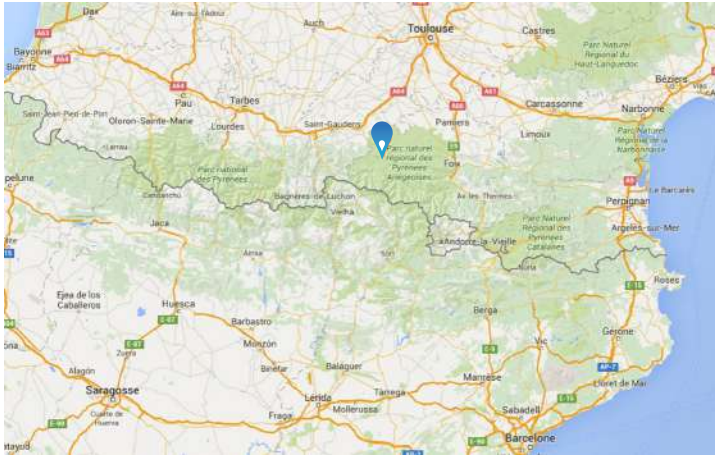
### ACCÈS AUX SERVICES

La station est ouverte toute l'année. Les sites sont accessibles uniquement par pirogue et/ou hélicoptère. Les missionnaires bénéficient de tout l'appui logistique nécessaire pour assurer leur venue depuis Cayenne et pour accompagner leurs projets. L'accueil sur place est assuré par du personnel qualifié qui met à disposition les moyens de recherche et d'hébergement, garantit l'hygiène et la sécurité des biens et des personnes et veille à l'entretien des sites.

### INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

La station soutient des projets novateurs en permettant le déploiement et le maintien d'équipements spécifiques à la recherche scientifique au cœur d'écosystèmes forestiers tropicaux préservés.

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Moulis en Ariège, Midi-Pyrénées  
42°57'30 "N 1°05'11"E

## DATE DE CRÉATION

Issue du Laboratoire souterrain créé en 1848, la station s'est reconvertie depuis janvier 2007 en une unité de recherche et de formation dédiée à l'écologie.

## CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENJEUX

Aujourd'hui, l'organisation et le contrôle des traits d'histoire de vie, les interactions entre les niveaux de complexité (gènes, développement, histoire de vie, interactions biotiques) sous forçages environnementaux, les liens entre biodiversité et fonctions, sont devenus des champs de recherche prioritaires en écologie. L'objectif de la SETE est d'aborder ces questions par le développement d'une instrumentation appropriée prenant notamment en considération en même temps les 3 dimensions temps-espace-évolution nécessaires à l'élaboration des prédictions sur l'état futur de l'environnement dans un contexte de changement.



## SERVICES

Les services offerts sont constitués par une plateforme expérimentale permettant la manipulation de nombreux objets biologiques, un centre de théorisation et de modélisation de la biodiversité, ainsi qu'un plateau d'imagerie IRM pour le phénotypage sur petit animal.

La plateforme expérimentale comporte :

- un métatron sur 4 ha composé de 48 cages à populations (conditions climatiques contrôlées),
- 750 m<sup>2</sup> de serres en 12 cellules indépendantes,
- 520 m<sup>2</sup> de volières (48 répliqués),
- des laboratoires (biologie moléculaire, cellulaire, physiologie, salle d'expérimentation-chirurgie),
- des salles d'élevages (invertébrés, poissons, amphibiens, reptiles),
- deux grottes naturelles équipées et instrumentées,
- deux aquatrons en projet.

La station SETE accueille chercheurs et conférences grâce à une capacité de logement de 28 chambres individuelles, et dispose d'une salle de conférence de 95 m<sup>2</sup>, ainsi que d'un parc de 5 véhicules.

## ACCÈS AUX SERVICES

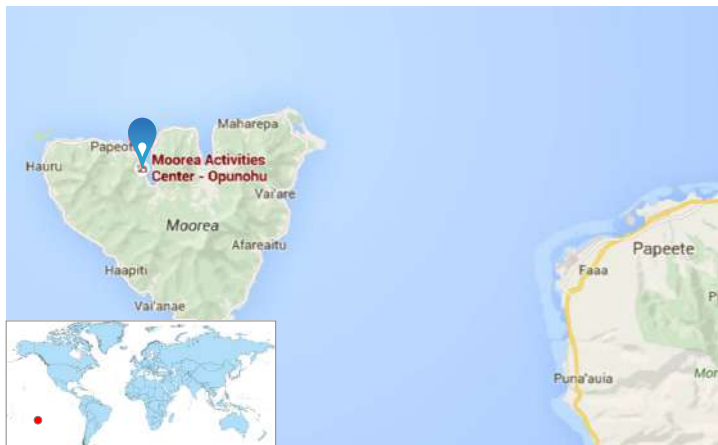
Un comité directeur est chargé d'examiner les projets soumis par les candidats à l'utilisation de la plateforme selon les critères suivants : l'intérêt scientifique, les besoins en services (appareils, espaces et matériels de laboratoire, d'élevage, de bureaux, d'hébergement, véhicules, etc.), la compatibilité avec les projets en cours et le montage financier.

## INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Le métatron est un ensemble de 48 cages à populations de 100 m<sup>2</sup> chacune, auxquelles il est possible d'imposer certaines conditions de température, d'humidité et de rayonnement solaire. Elles sont reliées entre elles par des corridors qui permettent de contrôler le niveau de dispersion. Un dispositif similaire pour le milieu aquatique est en cours de réalisation.



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Ile de Moorea, Polynésie française  
17°31'07" S ; 149°50'59" Ouest

## DATE DE CRÉATION

Janvier 2016

## CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENJEUX

A l'échelle globale, les récifs coralliens abritent 25 % de la faune et de la flore marines alors qu'ils ne couvrent que 0,2 % des surfaces marines. Outre l'aspect biodiversité, les récifs coralliens constituent un enjeu économique, social et culturel pour les habitants et les pays qu'ils bordent. A l'image des forêts, les récifs coralliens font face à des régressions dramatiques (près de 25 % ont déjà disparu, et 50 % sont en situation critique), notamment en raison de l'impact du changement climatique. C'est dans ce contexte que la SEE CORAIL met à disposition un ensemble de plateformes permettant de l'expérimentation *in vivo* et *in situ* sur le corail et plus globalement sur le récif corallien. Ces plateformes permettent de manipuler les variables liées au changement



climatique pour appréhender les processus de persistance des populations et des peuplements biologiques et mieux comprendre les mécanismes de résistance aux stress climatiques.

## SERVICES

La SEE CORAIL est intégrée dans le périmètre du Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement (CRIOBE). Elle bénéficie ainsi des facilités du CRIOBE telles que la capacité d'hébergement pour 30 personnes, un service de plongée sous-marine, 3 véhicules, 4 bateaux de récifs, et des bureaux d'accueil avec les facilités internet et de laboratoire équipé du matériel de base.

La SEE CORAIL met également à disposition :

- des salles d'expérimentation *in vivo* qui permettent de contrôler et de programmer des cycles température-pH-lumière dans un environnement d'eau contrôlé,
- des bassins extérieurs grands volumes permettant de prévoir des expériences plus larges et de contrôler également des cycles température-pH,
- une pépinière de corail avec des tables de bouturage pour une demande à façon selon les expérimentations.

## ACCÈS AUX SERVICES

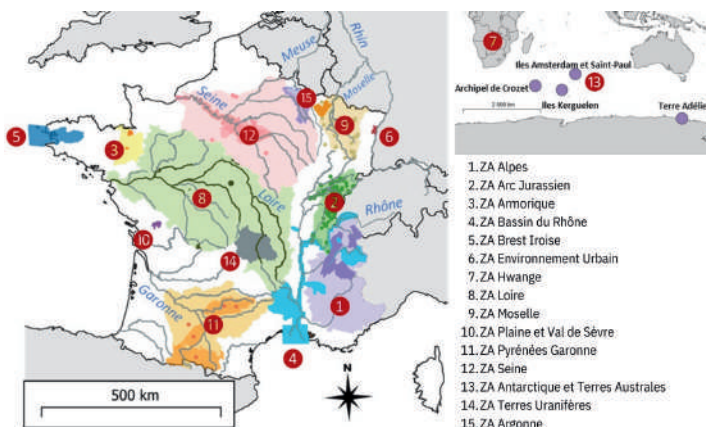
Un comité directeur est chargé d'examiner les projets soumis par les candidats à l'utilisation des plateformes selon les critères suivants : l'intérêt scientifique, les besoins en services (appareils, espaces et matériels de laboratoire, d'élevage, de bureaux, d'hébergement, véhicules, etc.), la compatibilité avec les projets en cours et le montage financier.

## INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Développement d'une plateforme de terrain amovible de nouvelle conception se positionnant sur le récif pour des expériences *in situ*. Conception en cours de construction.

## Observer, comprendre le fonctionnement et les trajectoires des socio-écosystèmes

Le Réseau des Zones Ateliers (RZA) est une infrastructure de recherche (IR) nationale qui regroupe les Zones Ateliers (ZA) labellisées par l'Institut Écologie et Environnement du CNRS. Certaines ZA existent depuis 35 ans, le Réseau lui-même a émergé dans les années 2000. Devenu SOERE en 2011, il est labellisé infrastructure de recherche en 2018. L'IR-RZA est unique dans le paysage des IR en France, ayant pour objet principal d'étude, les socio-écosystèmes (SES). Depuis 2020, l'IR-RZA participe en synergie avec l'IR-OZCAR (Observatoires de la Zone Critique) à la construction de l'infrastructure européenne eLTER (Long-Term Ecosystem Research).



Il existe actuellement 15 Zones Ateliers, ancrées dans les territoires, réparties en France métropolitaine (13), dans les terres australes (1) et au Zimbabwe (1). Les Zones Ateliers sont des zones géographiques, souvent à l'échelle régionale, structurées autour d'une unité fonctionnelle telle qu'un fleuve et son bassin versant, un massif montagnard, une zone côtière, ou des paysages agricoles ou urbains. Les recherches menées visent à comprendre le fonctionnement et les trajectoires, passées et futures de ces SES autour de trois axes structurants :

- Décrire, comprendre et prédire la réponse d'écosystèmes plus ou moins anthropisés aux changements globaux.
- Formaliser et théoriser le fonctionnement des socio-écosystèmes.
- Aider à leur gestion et gouvernance.

Le RZA adopte une approche systémique en combinant, sur le temps long, des approches bio-géophysiques, écologiques et sociétales, en lien avec les partenaires socio-économiques, dans une perspective de transformation des territoires vers plus de soutenabilité. Il s'agit d'une recherche fondamentale, orientée vers l'action.



## Développer une approche systémique des SES

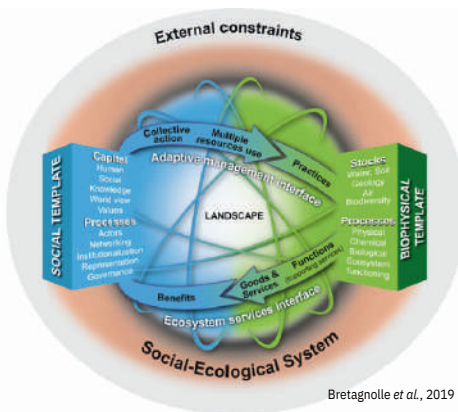
L'IR-RZA se positionne dans le champ des sciences de la soutenabilité. Le RZA bénéficie d'une diversité de situations contrastées et complémentaires du point de vue des écosystèmes et systèmes sociaux étudiés offrant un cadre approprié pour aborder la complexité des socio-écosystèmes en proie aux multiples effets des changements globaux.

Pour aborder cette complexité, les ZAs développent des approches systémiques impliquant (1) une interdisciplinarité large entre sciences de la vie, sciences de la terre, sciences humaines et sociales et sciences de l'ingénieur et (2) une transdisciplinarité forte, entendue au sens de co-recherches avec les acteurs des territoires que sont les services déconcentrés de l'Etat, les citoyens, les gestionnaires d'espaces protégés, les collectivités locales, les agences (eau, biodiversité, etc.).

L'IR socio-écologique, avec ces approches intégrées, fournit un certain nombre de services, tant pour la communauté scientifique que pour les parties prenantes et les décideurs. La co-construction des connaissances est le premier service rendu par une ZA sur son territoire, dans une optique d'aide à la décision et d'accompagnement des territoires dans leur transformation vers davantage de soutenabilité.

## De l'adaptation à la transformation

Le RZA a développé son propre cadre conceptuel des SES, mettant la co-gestion adaptative au cœur des approches des sciences de la soutenabilité et en intégrant explicitement la question des pratiques. Ce cadre commun rend les approches liant sociétés et nature plus opérationnelles et est en prise directe avec les problèmes émergents des territoires et des acteurs impliqués.



L'IR-RZA se positionne progressivement dans la branche de la « transformative science » des sciences de la soutenabilité : transformation des pratiques, des représentations, de la recherche et des formations. L'idée d'expérimentation, en particulier socio-écologique, est cruciale dans une perspective transformative, tout comme la question du changement d'échelle pour qu'une expérimentation réussie sur un territoire particulier puisse avoir un impact systémique global.

## CONTACTS ET ADRESSES

**Olivier Ragueneau**  
olivier.ragueneau@univ-brest.fr

Laboratoire des sciences de l'Environnement Marin -IUEM  
Technopole Brest Iroise  
Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané

<https://www.za-inee.org/>



# Infrastructure de recherche à long terme en environnement

## Une communauté de recherche socio-écologique pour la transformation des territoires

La question du passage à l'échelle dans une perspective transformative est abordée au niveau national à travers un fonctionnement en réseau, facilité par la mise en place du Laboratoire d'Idées des ZA (LIZA) constitué de 12 groupes de travail (GT) : 3 GT « Processus de recherche » (« Think Tank », Interdisciplinarité, Transdisciplinarité), 5 GT « Infrastructure de recherche » (Données et science ouverte, Services et Indicateurs, Europe, Communication, Formation) et 4 GT « Thématiques de recherche » (Trajectoires des SES, Santé et Environnement, Aires protégées, Gouvernance des SES). Le LIZA favorise la mutualisation des savoirs et techniques, renforce les dynamiques transversales pour permettre l'émergence de projets inter ZA, de nouveaux concepts dans la compréhension des SES et l'élaboration commune de publications et d'ouvrages.

Au niveau européen et international, ce passage à l'échelle a pour cadre eLTER. L'IR-RZA participe à cette dynamique à travers les programmes eLTER PPP et eLTER PLUS. Plus particulièrement le RZA via son groupe de travail « Europe » contribue à renforcer l'approche Socio-écosystémique des plateformes de recherche à long terme (LTSER), les modalités de gestion de données très hétérogènes (de champs disciplinaires et de cultures très différentes) et porte les spécificités du RZA à cet échelon européen.

L'infrastructure de recherche a été construite pour faire fonctionner et animer la communauté des Zones Ateliers avec leurs bases communes et leur diversité et permet ainsi :

- Des projets inter-ZA avec approches comparatives ou de tests d'hypothèses le long de gradients : climatiques, d'anthropisation, d'historique des relations chercheurs-acteurs sur les territoires.
- Une co-construction de scénarios pour décrire plusieurs trajectoires possibles des SES.
- Des appels à projets de recherche exploratoires au sein des ZA.
- De nombreux contrats de recherche nationaux et européens.
- De nombreuses publications interdisciplinaires.
- Des actions transverses autour de la gestion et de la mise à disposition des données via le groupe de travail « Données et science ouverte » : mise en place d'outils mutualisés de stockage, de visualisation, de partage et de valorisation des données de la recherche (Geonetwork, Geoflow, InDoRES, ZATimeline, Frise chronosystémique...) en lien, en autres, avec BBEES, les OHM, eLTER, le PNDB, DATA TERRA.
- Un cadre de formation unique inter- et trans-disciplinaire, pour les cursus universitaires, d'ingénieurs, pour les plus jeunes et pour la formation professionnelle sur les territoires.
- Des contrats doctoraux et post-doctoraux et l'accueil de nombreux stagiaires.
- Une école d'hiver annuelle sur les socio-écosystèmes.
- Des séminaires thématiques et un colloque biennal réunissant tous les acteurs des Zones Ateliers et ouvert à la communauté scientifique.
- Des acteurs locaux associés à l'élaboration des thématiques de recherche et participant aux instances de gouvernances des ZA.
- De nombreux contrats de recherche avec les collectivités locales.
- L'organisation d'un comité au niveau de l'IR réunissant les partenaires non académiques des ZA ou nationaux et le Tiers Secteur de la recherche, pour partager les bonnes pratiques, identifier les besoins et des solutions communes.
- La valorisation et le transfert des connaissances auprès des institutions, des décideurs publics, des parties prenantes et des citoyens.

## Les Chiffres clés du RZA



15 ZA

13 en France métropolitaine

1 ultramarine

1 à l'étranger



+ 1800

personnels de la recherche



25 organismes de recherche

80 universités

26 grandes écoles

De nombreux acteurs impliqués dans chaque ZA



+ 10 M€

de contrats de recherche par an



En 2023 :

240 doctorats

75 post doctorats

Nombreux stagiaires de master et licence



+ 200

publications évaluées par les pairs par an



+50 ouvrages ou chapitres publiés par an

+ de 700 fiches de métadonnées sur le Geonetwork du RZA



## Le laboratoire des idées des ZA

3 Groupes de travail Processus de recherche  
5 Groupes de travail Infrastructure de recherche  
4 Groupes de travail Thématiques de recherche

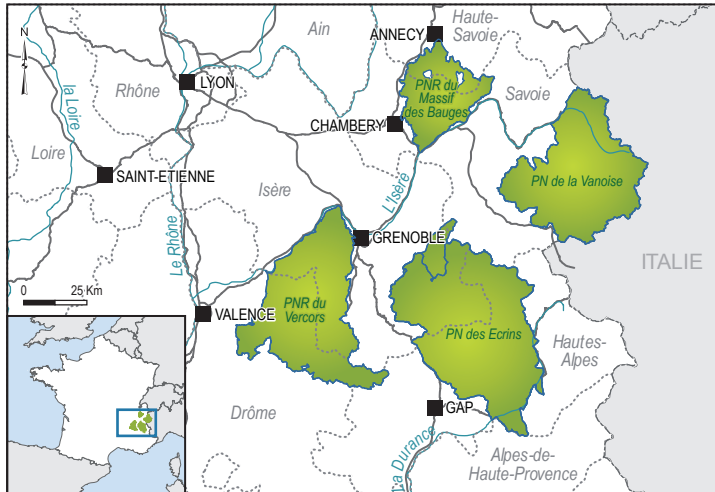
## CONTACTS ET ADRESSES

Olivier Ragueneau  
olivier.ragueneau@univ-brest.fr

Laboratoire des sciences de l'Environnement Marin -IUEM  
Technopole Brest Iroise  
Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané

<https://www.za-inee.org/>

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Sites d'études dans les Alpes françaises

## DATE DE LABELLISATION

2008

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Les territoires de montagne présentent une grande diversité de systèmes écologiques et d'activités humaines (agro-sylvo-pastoralisme, tourisme, chasse, ...). Les changements climatiques, économiques et sociétaux amènent à s'interroger sur la réponse des diversités biologiques, sur l'adaptation des systèmes de production, et plus généralement sur les vocations des territoires de montagne entre agriculture, tourisme et composante naturelle du paysage.

Les écosystèmes de montagne constituent l'objet principal des recherches de cette Zone Atelier. Les territoires d'étude sont localisés à proximité de Grenoble et de Chambéry. Ils incluent deux parcs nationaux (Ecrins et Vanoise), deux parcs naturels régionaux (Vercors et Massif des Bauges) et plusieurs réserves naturelles.

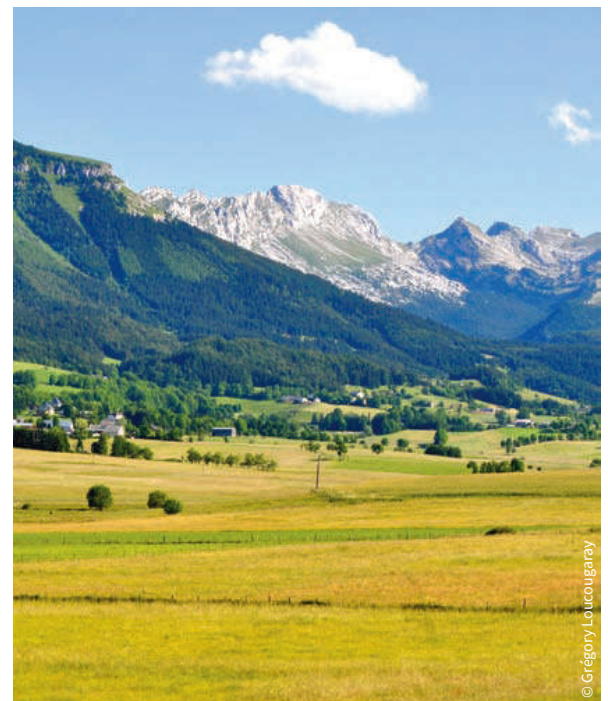


## PROBLÉMATIQUE

Les activités de la Zone Atelier concernent l'étude de la diversité, du fonctionnement et des services des écosystèmes alpins dans un contexte de changement climatique et de mutations des territoires de montagne. Les recherches s'appuient sur un réseau de sites d'observation de long terme et sur la plateforme d'écologie expérimentale de la Station Alpine Joseph Fourier située au col du Lautaret. Elles sont menées en étroite concertation avec les gestionnaires des territoires.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Dynamiques des diversités biologiques dans les Alpes : l'apport des paléosciences pour la reconstitution des paléoenvironnements alpins, la modélisation des distributions et des dynamiques des diversités, l'étude des transformations des paysages et les impacts sur leurs diversités
- Fonctionnement et services des écosystèmes alpins : le rôle des facteurs du milieu (climat, enneigement) et des activités humaines sur les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau, le fonctionnement et les services des sols de montagne, les couplages entre mode d'utilisation des terres, diversités et services écologiques
- Interrelations entre systèmes écologiques et systèmes d'activités : les activités de tourisme en montagne, la place des espaces protégés, les relations entre les activités humaines et la faune sauvage, les relations entre vallées et montagnes



## CONTACTS ET ADRESSES

**Philippe Choler**  
philippe.choler@ujf-grenoble.fr

**Thomas Spiegelberger**  
thomas.spiegelberger@irstea.fr

Laboratoire d'Ecologie Alpine (LECA)  
2233 rue de la Piscine  
38041 Grenoble Cedex 9

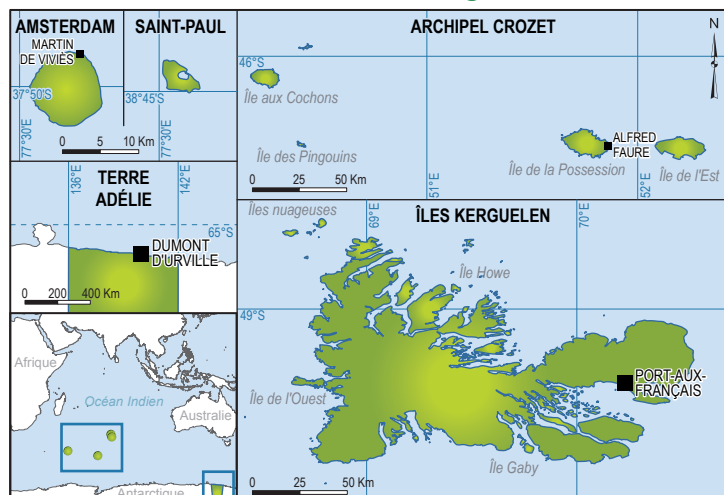
IRSTEA-EMGR Ecosystèmes montagnards  
2, rue de la Papeterie- Domaine universitaire  
BP 76  
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

<http://www.za-alpes.org/>



# ZONE ATELIER ANTARCTIQUE ET SUBANTARCTIQUE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Sites d'études en région australe

## DATE DE LABELLISATION

2000

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Le territoire de la Zone Atelier comprend des sites isolés, à fortes contraintes climatiques, caractérisées par des vents forts, une humidité élevée dans certains territoires, extrêmement basse dans d'autres, et des températures constamment faibles, qui ont induit des adaptations biologiques et physiologiques spécifiques chez les organismes.

La Zone Atelier regroupe, au sein des Terres Australes et Antarctiques Françaises, quatre sites d'un vaste territoire qui s'étend de l'Antarctique (Terre Adélie) aux eaux subtropicales de l'océan Indien (îles Saint-Paul & Amsterdam), en passant par deux groupes d'îles subantarctiques (archipel Crozet, îles Kerguelen).



## PROBLÉMATIQUE

Les sites ateliers sont le support de suivis à long terme en milieu terrestre et en milieu marin. Les suivis concernent des changements qui s'opèrent à l'échelle des organismes, des populations et des écosystèmes sous l'impact combiné des activités humaines (pêche, tourisme) et des modifications du climat. La Zone Atelier se focalise en particulier sur la dynamique à long terme de la biodiversité et des écosystèmes polaires. Les populations d'oiseaux et de mammifères marins, d'une richesse et d'une diversité remarquables, sont affectées par les pêcheries, de manière directe (mortalité liée à certaines techniques de pêche) ou indirecte (disponibilité des ressources alimentaires). Sur terre, les introductions volontaires ou involontaires d'espèces (lapin, rat, souris, mais aussi plantes et invertébrés) représentent de sérieuses menaces pour la biodiversité de ces écosystèmes dont les organismes ont évolué d'une manière originale, en contact restreint avec les flores et les faunes continentales. Des contaminants anthropogéniques (métaux lourds, polluants organiques persistants) interviennent également malgré l'éloignement prononcé de ces sites. A cela s'ajoute l'impact du changement actuel du climat, particulièrement marqués sous ces hautes latitudes.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Impact du changement climatique et des espèces introduites sur les écosystèmes terrestres
- Dynamique à long terme des espèces, des populations et des communautés
- Réseaux trophiques, stratégies alimentaires (prédateurs autochtones ou introduits)
- Caractérisation physique et biologique de l'écosystème pélagique grâce au suivi de populations de prédateurs supérieurs, oiseaux et mammifères marins
- Conservation du milieu marin et des prédateurs supérieurs
- Développements méthodologiques : bio-logging, écologie chimique, télédétection, biologie moléculaire

## CONTACTS ET ADRESSES

**Jean-Patrice Robin**  
jean-patrice.robin@iphc.cnrs.fr

**Jacques Labonne**  
jacques.labonne@inra.fr

UMR 7178 CNRS/UdS  
Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien  
23 rue Becquerel  
F-67087 Strasbourg CEDEX-2 – France

UMR ECOBIOP 1224 INRA-UPPA  
Aquapole INRA, Quartier Ibarro  
64310 Saint-Pée sur Nivelle – France

<http://za-antarctique.univ-rennes1.fr/>  
[https://twitter.com/ZA\\_Antarctique](https://twitter.com/ZA_Antarctique)



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Les écosystèmes aquatiques, terrestres et souterrains de l'Arc Jurassien

## DATE DE LABELLISATION

2013

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

L'Arc Jurassien regroupe un ensemble de milieux s'étendant de la plaine du Doubs aux sommets des monts du Jura, qui culminent à un peu plus de 1 700 m. Pour l'essentiel, le massif jurassien correspond à un milieu de moyenne montagne, constitué d'une succession de plateaux calcaires drainés par un réseau karstique dense. La morphologie du Jura est favorable au développement, très ancien, des activités humaines. De plus, la proximité de la Suisse a conduit à des échanges importants de personnes et de biens.

La Zone Atelier Arc Jurassien porte ses études sur les hydrosystèmes karstiques, les lacs et les tourbières, les sols et les agrosystèmes. Elle est composée de multiples dispositifs d'observation pour étudier la diversité des prairies, les variations de densité de rongeurs d'intérêt agricole et leurs prédateurs, la qualité de l'air, l'exposition de la faune sauvage aux contaminants (organismes pathogènes et substances chimiques), la santé humaine et la mise en valeur des ressources territoriales et patrimoniales.

## PROBLÉMATIQUE

La Zone Atelier Arc Jurassien fédère et soutient un réseau multidisciplinaire de recherches partenariales conduites sur les interactions entre environnement, société et dynamique des systèmes socio-écologiques de moyenne montagne. Les laboratoires partenaires s'intéressent en particulier à l'étude des changements environnementaux au cours du temps long et aux liens entre l'environnement et la santé des écosystèmes et des hommes. L'objectif est d'approfondir l'étude du système régional constitué par l'Arc Jurassien, de renforcer les coopérations avec les acteurs socio-économiques locaux, de pérenniser sur le long terme des sites observatoires en écologie-environnement-société, d'assurer la gestion des données qui en sont issues et de valoriser les résultats obtenus par



des méthodes de recherche s'appuyant sur ces sites et sur les problématiques issues de l'analyse d'un ensemble régional.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Quelles sont les réponses des systèmes écologiques régionaux aux changements environnementaux locaux et globaux, notamment dans leurs racines historiques et leur développement futur sur le temps long ?
- Comment s'organisent les liens complexes entre les activités humaines et la santé des écosystèmes et des hommes ?
- Comment l'environnement et les usages des territoires influencent-ils la qualité des aliments au sein d'un espace de moyenne montagne ?
- Quels sont les outils économiques pour amener à de meilleures pratiques environnementales en milieu de moyenne montagne ?



## CONTACTS ET ADRESSES

**Daniel Gilbert**  
daniel.gilbert@univ-fcomte.fr

Chrono-environnement  
Université de Franche-Comté  
16 route de Gray  
25030 Besançon cedex

**Hélène Celle-Jeanton**  
helene.jeanton@univ-fcomte.fr

<http://zaaj.univ-fcomte.fr>



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Sites ateliers : agricole (bocages de Pleine Fougère et Marais du Couesnon) et urbain (Rennes métropole)

## DATE DE LABELLISATION

2001

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Les recherches menées dans la Zone Atelier portent sur l'influence des dynamiques du paysage sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Deux types de paysage sont étudiés : les paysages agricoles et urbains. La Zone Atelier a pour limite le département d'Ille-et-Vilaine. Elle comprend deux sites ateliers plus particulièrement instrumentés, objets de suivis sur le long terme. Ces sites représentent un gradient de paysage (du bocage traditionnel à l'openfield pour le site atelier « bocage » et de l'urbain dense au périurbain pour le site atelier « ville »). Le territoire de la ZAA englobe trois entités complémentaires :



- Un territoire bocager plus ou moins dégradé géré par des systèmes de polyculture-élevage,
- La basse vallée du Couesnon comprenant un éco-complexe de plusieurs marais. Ces marais présentent des configurations paysagères très variées, issues de trajectoires historiques différentes en termes de gestion de l'eau et des usages,
- L'observatoire urbain de Rennes Métropole englobant Rennes et les communes limitrophes.

## PROBLÉMATIQUE

Les recherches visent à analyser comment des territoires maintiennent ou restaurent des services éco-systémiques. La spécificité de cette Zone Atelier est de s'intéresser à une thématique commune, le paysage, en abordant les questions scientifiques ou sociétales qui s'y rattachent par des approches pluridisciplinaires. Les travaux cherchent plus particulièrement à analyser : 1) le rôle des structures sociales passées et actuelles sur la dynamique des paysages ; 2) l'influence du paysage sur l'organisation de la biodiversité ; 3) l'influence du paysage sur les processus écosystémiques. Les paysages étudiés sont des paysages sujets à des contraintes anthropiques majeures (paysages ruraux et urbains).

## THÉMATIQUES CLÉS

- Hétérogénéité spatio-temporelle des paysages : du temps court (saison, année) au temps long (siècle, millénaire)
- Usage, gestion et aménagement des paysages
- Impact des structures paysagères et de leur modification sur les services écosystémiques (service de régulation, conservation de la biodiversité, protection des sols, maintien de la qualité de l'eau, etc.)
- Rôle des politiques publiques de préservation de l'environnement sur la dynamique d'aménagement et d'usage des paysages

## CONTACTS ET ADRESSES

**Christophe Piscart**  
christophe.piscart@univ-rennes1.fr

CNRS - ECOBIO  
Université de Rennes 1  
Avenue du Général Leclerc  
35042 Rennes cedex

**Cendrine Mony**  
cendrine.mony@univ-rennes1.fr

<http://osur.univ-rennes1.fr/za-armorique/>



# ZONE ATELIER BASSIN DE LA MOSELLE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le bassin versant de la Moselle

## DATE DE LABELLISATION

2001

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Bénéficiant d'une diversité géologique, paysagère, historique et anthropique qui juxtapose des entités très différentes et bien caractérisées, le bassin de la Moselle constitue un territoire d'exception pour des approches pluridisciplinaires avec des problématiques complémentaires.

De ses sources sous le col de Bussang dans les Vosges, à son confluent avec le Rhin à Coblenche, en Allemagne, la Moselle parcourt 520 km et concerne trois Etats européens, pour une superficie de bassin-versant de 28 300 km<sup>2</sup> dont plus de la moitié (15 400 km<sup>2</sup>) en France. La partie française présente une occupation du territoire très contrastée, associée à des pressions anthropiques spécifiques. L'amont du bassin est dominé par le massif forestier vosgien installé sur des sols acides (substrats cristallins ou gréseux). Après les fortes perturbations occasionnées par les dépôts atmosphériques acides des années 1970-1980, ces écosystèmes forestiers de moyenne montagne subissent désormais une exploitation forestière accrue. La partie moyenne et aval du bassin français correspond à une succession de cuestas caractérisées par des plateaux calcaires aux sols perméables et par des plaines avec une dominante de sols argileux. L'agriculture, en particulier la polyculture-élevage, ainsi que la pisciculture sont présentes sur la partie moyenne du bassin qui reçoit des apports réguliers d'intrants agricoles (engrais, pesticides...). L'aval du bassin est caractérisé par une urbanisation croissante (Nancy, Toul, Metz, Thionville) et par l'héritage du passé industriel lorrain (bassin minier et sidérurgique). Néanmoins, tout au long de son parcours, la Moselle contribue à maintenir des écosystèmes humides qui présentent une riche biodiversité (réserve naturelle régionale de la Moselle Sauvage par exemple).

## PROBLÉMATIQUE

La rivière Moselle représente une ressource essentielle tant pour la production d'eau potable que pour les activités agricoles, piscicoles et industrielles actuelles (filiales papier, nucléaire, ...). Or les pressions multiples auxquelles sont soumis le bassin-versant et le cours d'eau lui-même, parfois spécifiques aux territoires traversés, sont à l'origine d'une dégradation potentielle, voire avérée, de la qualité de la ressource en eau et des fonctionnalités des écosystèmes. Les études menées au sein de la Zone Atelier consistent à évaluer l'impact de ces différentes pressions sur les écosystèmes aquatiques et terrestres et sur la qualité de l'eau par des approches pluridisciplinaires. Une attention particulière est portée à l'élaboration de solutions de remédiation, en privilégiant le partenariat avec les acteurs du territoire (agriculteurs, pisciculteurs, communes, Agence de l'Eau, services de l'Etat...).

Par son caractère transfrontalier, le bassin versant de la Moselle porte des enjeux qui dépassent le territoire national, ce qui étend l'intérêt des programmes scientifiques de la Zone Atelier à deux pays voisins.



## THÉMATIQUES CLÉS

- Cycles biogéochimiques - dynamique des populations : évolution des écosystèmes forestiers en réponse aux pressions anthropiques (exploitation forestière, acidification, érosion...) et aux changements climatiques globaux
- Flux et stockage de polluants - écotoxicologie : impact des pressions anthropiques historiques (sidérurgie) et actuelles (agricole, urbaine) et d'actions de restauration (effacement de barrage, renaturation de cours d'eau...) sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (sédiment, eau, poisson, plante...)
- Remédiation : élaboration d'actions et d'aménagements (zones humides construites, station d'épuration...) en lien avec les acteurs territoriaux et évaluation de l'efficacité des solutions existantes pour éliminer des micropolluants chimiques et les contaminations microbiennes (antibiorésistance...)

## CONTACTS ET ADRESSES

**Sylvie Douset**  
sylvie.douset@univ-lorraine.fr

OTELO  
15 Avenue du Charmois  
BP 40

**Arnaud Legout**  
arnaud.legout@inra.fr

54500 Vandœuvre Les Nancy

<http://www.zam.univ-lorraine.fr>

**Jean-François Munoz**  
jean-francois.munoz@anses.fr

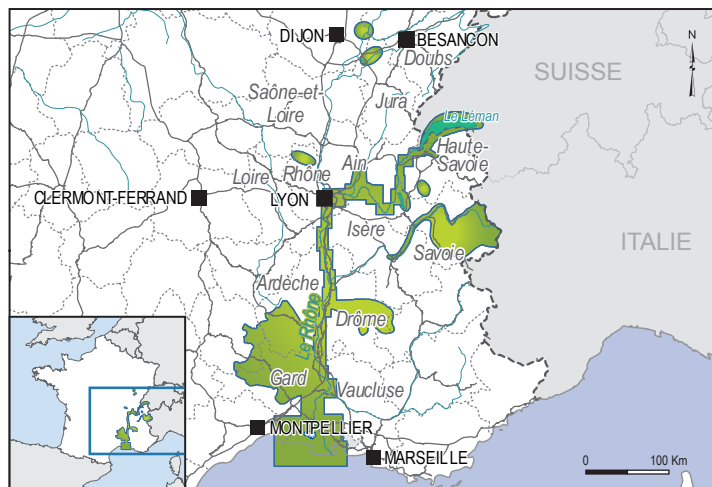
**Marie-Noëlle Pons**  
marie-noelle.pons@univ-lorraine.fr





# ZONE ATELIER BASSIN DU RHÔNE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Sites d'études du bassin du Rhône

## DATE DE LABELLISATION

2001



## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Les études portent sur les écosystèmes aquatiques de surface et souterrains du fleuve et de son bassin versant, leur fonctionnement et leur dynamique ainsi que les interactions avec les sociétés humaines sous forçage climatique. La Zone Atelier se décline en sites ateliers et en observatoires permettant d'aborder des problématiques complémentaires :

- Le site « Zones humides », site multipolaire réparti dans les plaines alluviales du Rhône, de l'Ain, du Doubs et de la Saône,
- Le site « SIPIBEL », site expérimental situé sur le bassin de l'Arve, siège d'un nouveau centre hospitalier et d'une station d'épuration,
- Le site « Arc Isère » partie amont du bassin de l'Isère fortement aménagé et contraint par les activités humaines,
- Le site « Ardières », siège d'une viticulture intensive,
- Le site « Drôme », représentatif d'une zone encore peu affectée par les activités humaines,
- Le site « Rivières cévenoles » qui subit des phénomènes méditerranéens extrêmes,



- L'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine - OTHU, qui a pour objectif l'observation des rejets urbains et de leurs impacts sur les milieux récepteurs,
- L'Observatoire des Lacs péri-alpins, qui a pour ambition de comprendre, et in fine de modéliser, l'évolution de l'état et des fonctionnements écologiques de systèmes lacustres,
- L'Observatoire des sédiments du Rhône, qui vise à produire de la connaissance sur la dynamique des flux de matière, de stocks sédimentaires et de pollutions associées,
- L'Observatoire Hommes-Milieux - OHM Vallée du Rhône, qui fédère des grands projets de recherche du Rhône et propose d'analyser la politique de développement durable mise en place suite à la crue de 2003.

## PROBLÉMATIQUE

La Zone Atelier se focalise sur deux grandes problématiques :

- Les conséquences du changement climatique sur le fleuve, ses affluents et la dynamique des organismes qu'ils hébergent,
- Le poids des aménagements dans le fonctionnement des hydrosystèmes, la restauration de leurs fonctionnalités, et l'identification des biens et services rendus.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Changements climatiques et ressources : comment les ressources hydriques et écologiques sont-elles impactées par les changements climatiques ?
- Flux, formes, habitats, biocénoses : quelles sont les relations entre habitats physiques, hydrologie, dynamique fluviale et biodiversité ? Quels sont les effets des modes de gestion ?
- Flux polluants, écotoxicologie, écosystèmes : comment les apports multiples de contaminants modifient les milieux aquatiques et la biodiversité ? Comment évaluer le risque environnemental pour la santé des écosystèmes ?
- Observation sociale des territoires fluviaux, gouvernance : quelle compréhension avons-nous des phénomènes sociaux intervenant dans les politiques de gestion des milieux aquatiques ?

## CONTACTS ET ADRESSES

**Anne Clémens**  
anne.clemens@zabr.org

**Pierre Marmonier**  
pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

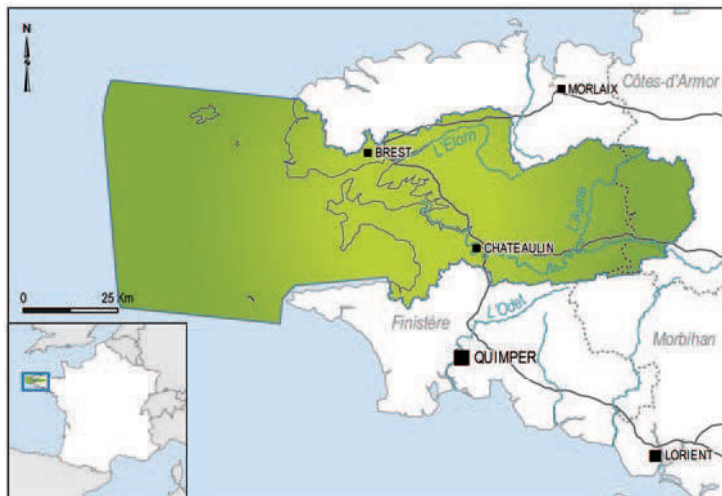
**Nicolas Lamouroux**  
nicolas.lamouroux@irstea.fr

ZABR-GRAIE  
LyonTech La Doua  
Bâtiment CEI Insavalor  
66 boulevard Niels Bohr - CS 52132  
69 603 Villeurbanne cedex - France

<http://www.graie.org/zabr/index.htm>

# ZONE ATELIER BREST IROISE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le bassin versant, la rade de Brest et la mer d'Iroise

## DATE DE LABELLISATION

2012

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Le socio-écosystème côtier et le continuum terre-mer, dans un contexte de changement global, structurent la Zone Atelier. Son territoire (environ 6 000 km<sup>2</sup> dont les 2/3 en mer) s'étend de la rade de Brest à la mer d'Iroise, îles et bassin versant compris.

La situation géomorphologique et hydrologique génère une mosaïque d'habitats, abritant le plus grand champ d'algues en Europe, la quasi-totalité des espèces de poissons inventoriées sur la façade atlantique et dans la Manche, ainsi que le quart de la population française de mammifères marins. Cette zone est également le siège d'une multitude d'usages et d'activités : plaisance, pêche, exploitation de macroalgues, transport maritime, etc.



© Damien Le Guyader

Le système insulaire d'Iroise comprend les îlots inhabités de l'archipel de Molène et trois îles habitées : Molène, Ouessant et Sein. Ces îles sont marquées par un déclin de leur population et une diversification de leurs activités.

L'évolution des plages de la mer d'Iroise est principalement modulée par deux types de forçages : l'érosion marine et la fréquentation humaine.

## PROBLÉMATIQUE

Les recherches de la Zone Atelier Brest Iroise ont pour objectif de comprendre le fonctionnement et l'évolution du socio-écosystème côtier, dans un contexte de changements (climatiques et anthropiques) et dans une perspective de gestion intégrée. Les travaux combinent sciences de l'environnement et sciences humaines et sociales. Les conditions de l'appropriation des connaissances par les non-scientifiques et la mise en commun des connaissances scientifiques avec l'ensemble des savoirs qui sont distribués dans les différents pans de la société représentent un objectif essentiel de cette Zone Atelier.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Vulnérabilité d'un écosystème côtier face aux risques d'érosion et de submersion
- Transferts terre-mer et leurs conséquences socio-écosystémiques
- Conservation de la biodiversité et gestion des usages
- Relations entre sciences et société
- Interactions Homme-Nature de la Préhistoire à nos jours

## CONTACTS ET ADRESSES

**Pierre Stéphane**  
pierre.stephan@univ-brest.fr

IUEM Technopôle Brest-Iroise  
Rue Dumont d'Urville  
29280 Plouzané - FRANCE

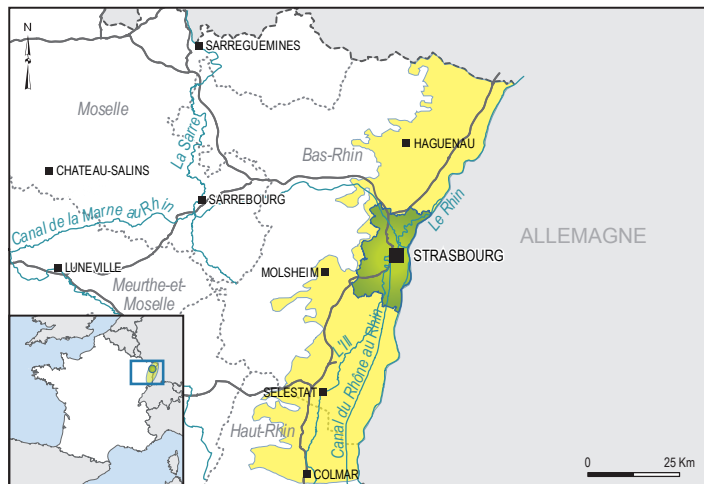
**Olivier Ragueneau**  
olivier.ragueneau@univ-brest.fr

<http://www-iuem.univ-brest.fr/zabri/fr>



# ZONE ATELIER ENVIRONNEMENTALE URBAINE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



L'Eurométropole de Strasbourg (vert) et la plaine d'Alsace (jaune)



## DATE DE LABELLISATION

2011

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Le paysage urbain, sous contraintes de croissance urbaine et de transformation des milieux et des paysages environnants, constitue l'objet d'étude de la Zone Atelier.

La Zone Atelier est constituée par le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), qui s'étend sur 28 communes, limitée dans sa partie est par le Rhin et la frontière avec l'Allemagne. L'EMS fait partie des territoires les plus densément peuplés et urbanisés en France, avec 43 % (soit 483 194 habitants) de la population du Bas-Rhin dont 60 % dans la commune de Strasbourg (données INSEE 2016). Avec une densité de 1 527 hab/km<sup>2</sup>, l'EMS est dotée d'un important réseau hydrographique, contribuant à la diversification des paysages et à des situations urbaines particulières (risques d'inondation élevés, réseaux d'approvisionnement

et d'assainissement complexes, abondance des corridors fluviaux et écologiques). Les paysages de la plaine rhénane ont été fortement modifiés par l'urbanisation, en intégrant, au sein des espaces urbanisés, des zones humides, des forêts alluviales, des points d'eau, des îles, etc. qui confèrent à l'agglomération strasbourgeoise un caractère particulier à l'échelle nationale.

## PROBLÉMATIQUE

L'objectif principal de la Zone Atelier est de co-construire la connaissance nécessaire pour un développement urbain durable. Elle a pour objet l'observation à long terme d'un socio-écosystème complexe dont les composants (sociaux, techniques, bâtis, biotiques, abiotiques) interagissent selon des dynamiques hétérogènes à des échelles variables de temps et d'espace.

La problématique prend en compte notamment les pressions qui pèsent sur les écosystèmes sociaux et naturels qui les composent (changement global, crises socio-environnementales, érosion de la biodiversité, altération ou destruction des milieux) et les actions entreprises pour y faire face à diverses échelles temporelles et spatiales.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Ecosystèmes et fonctionnement
- Biodiversité urbaine
- Ressources naturelles et effets des processus d'urbanisation (air, sol, eau)
- Agriculture urbaine
- Transition écologique et société



## CONTACTS ET ADRESSES

**Sandrine Glatron**  
**Nadège Blond**  
**Isabelle Charpentier**

dir-zaeu@live-cnrs.unistra.fr

Laboratoire Image Ville Environnement,  
Faculté de Géographie et d'Aménagement  
3 rue de l'Argonne  
67000 Strasbourg

<https://zaeu-strasbourg.eu/>

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le parc national de Hwange et sa périphérie, au Zimbabwe (Afrique australe)

## DATE DE LABELLISATION

2011

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

La Zone Atelier Hwange se structure autour d'une aire protégée contenant un hotspot de biodiversité des grands mammifères, dont une population d'éléphants qui atteint des densités exceptionnelles, et qui est en interdépendance avec les communautés humaines dans un contexte de changement climatique et de mutation économique (notamment la création du parc transfrontalier Kavango-Zambezi).

Le territoire de la Zone Atelier comprend le parc national et sa périphérie (incluant les zones agricoles, les zones forestières et les zones de chasse publique ou privée). La zone s'étend sur 28 000 km<sup>2</sup>, dont 15 000 km<sup>2</sup> de parc national.



## PROBLÉMATIQUE

La Zone Atelier se focalise sur la dynamique de la biodiversité et l'utilisation durable des savanes. Une question majeure se pose : quel est le rôle d'une aire protégée dans la résilience du système socio-écologique qui l'englobe ?



Les recherches s'attachent à comprendre la dynamique des systèmes socio-écologiques incluant une ou plusieurs aires protégées, en analysant notamment le rôle de l'aire protégée comme un fournisseur de services écosystémiques pour les populations humaines périphériques dans un contexte de changement global.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Dynamique de l'écosystème : sa production primaire et secondaire et le rôle du climat (pluies, température, etc.), des sols, des herbivores, du feu et de la gestion par les humains dans l'embroussaillage. Les interventions des gestionnaires et les prélèvements par les communautés humaines sont des éléments de la dynamique de l'écosystème qui font un lien fort et explicite avec le thème «insertion de l'aire protégée dans un paysage plus global »
- Dynamique des populations et des communautés animales : analyse du rôle de la taille corporelle des animaux dans les relations de compétition entre eux, et dans les relations entre prédateurs et proies ainsi que le rôle des pathogènes dans ces interactions
- Relations trophiques induites par les changements d'abondance des herbivores et des carnivores dominants, qui fait un lien explicite avec le thème « dynamique de l'écosystème »
- Insertion de l'aire protégée dans un paysage plus global : analyse des flux et du comportement des animaux en zones anthropisées, étude sur la viabilité de l'aire protégée dans son contexte et étude des conditions de coexistence entre activités humaines et faune sauvage à la périphérie de l'aire protégée. La durabilité du système Hwange est un objet d'étude en tant que tel, dans lequel l'analyse des services écosystémiques rendus par l'aire protégée est primordiale

## CONTACTS ET ADRESSES

**Hervé Fritz**  
herve.fritz@univ-lyon1.fr  
ou hrv.fritz@gmail.com

Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive  
Université de Lyon 1  
43, Boulevard du 11 Novembre 1918  
69622 Villeurbanne Cedex

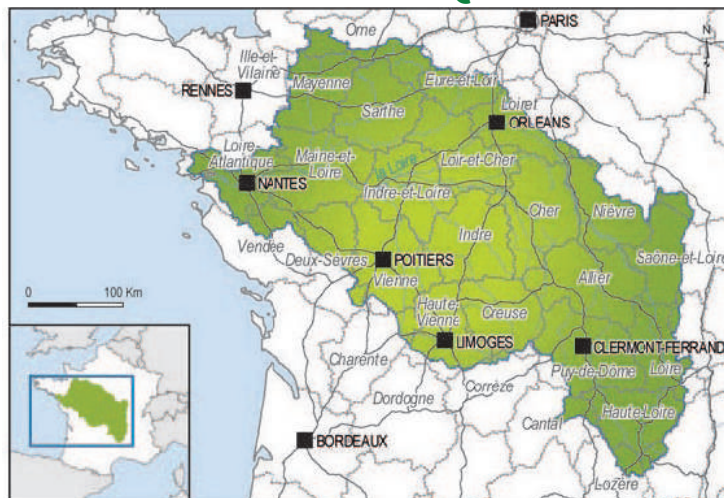
**Simon Chamaille-Jammes**  
simon.chamaille@cefe.cnrs.fr

<http://www.za-hwange.cnrs.fr/>





## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le bassin versant de la Loire (127 000 km<sup>2</sup>)

## DATE DE LABELLISATION

2001

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

La Zone Atelier Loire se structure autour de l'hydrosystème Loire, des sociétés humaines sur son bassin versant et de la co-évolution hydrosystème – sociétés depuis plus de 15 000 ans.

Elle mène des études sur le fleuve Loire, ses affluents et leurs dynamiques. Des sites ateliers font l'objet de campagnes de mesures ou de collecte de données lors de travaux associant des disciplines différentes ainsi que des gestionnaires autour d'un questionnement phare.



- Bassin versant de la Maine : dynamiques d'une rivière de faible énergie, drainant un bassin de 22 000 km<sup>2</sup> (suivi des crues et du fonctionnement de l'hydrosystème), restauration de la continuité écologique, fonctionnement des zones humides, risques d'inondation
- Le Louroux (Indre-et-Loire) : fonctionnement d'un bassin versant agricole (24 km<sup>2</sup>, 8 stations de mesure eau et matières en suspension)
- La tourbière de La Guette (Cher, Sologne, 25 ha) : réhabilitation des services éco-hydrologiques (stockage de carbone, hydrologie, biodiversité), site instrumenté (suivi hydrologie, météo, biodiversité, physico-chimie du sol, émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) et labellisé SNO : Service National d'Observation Tourbières (<http://www.insu.cnrs.fr/node/3988>)
- Ilots de Mareau-aux-prés (Loiret, Réserve Naturelle Nationale de St-Mesmin, 13 ha) soumis à la dynamique fluviale : étude du fonctionnement hydrosédimentaire et écologique, analyse des impacts des travaux réalisés dans le lit endigué et des dynamiques des paysages

## PROBLÉMATIQUE

Les travaux menés utilisent des données historiques pour alimenter les recherches et nourrir des réflexions prospectives. Ils concernent principalement les interactions sociétés-environnement en lien direct ou indirect avec le fleuve ou avec ses principaux affluents. La Zone Atelier Loire vise également à fournir des éléments de réponse aux attentes sociales, économiques et politiques ainsi que des clés permettant d'avoir une démarche prospective pertinente.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Fonctionnement et dynamique du système ligérien : comprendre et documenter les composantes abiotiques, biotiques et socio-systémiques du bassin versant ligérien, ainsi que leurs interactions dans la longue durée dans une logique de système d'observation
- Recherche-Action - transferts de savoirs et de compétences : transférer les connaissances scientifiques dans les champs de l'application, de l'expertise et de la décision (ingénierie environnementale) et, plus largement, développer les interactions entre scientifiques et acteurs du territoire

## CONTACTS ET ADRESSES

**Sylvie Servain**  
sylvie.servain@insa-cvl.fr

CITERES UMR7324  
33 allée F. de Lesseps  
37200 Tours

**Mathieu Bonnefond**  
mathieu.bonnefond@cnam.fr

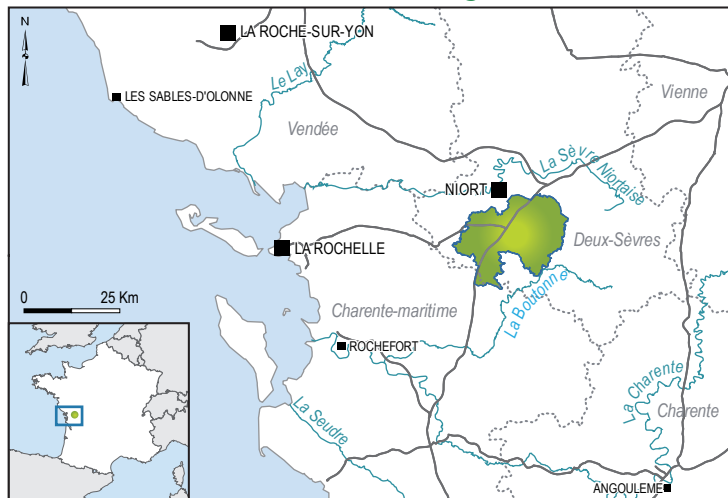
<http://www.za-loire.org/>

**Jean Secondi**  
jean.secondi@univ-angers.fr



# ZONE ATELIER PLAINE ET VAL DE SÈVRE

## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



La ZA PVS est située dans le département des Deux-Sèvres, région Nouvelle-Aquitaine.

## DATE DE LABELLISATION

2009



## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

La Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre est une zone d'étude de 450 km<sup>2</sup>, excluant la Forêt de Chizé. Il s'agit d'une zone rurale peu peuplée (62 habitants / km<sup>2</sup>), typique du climat océanique atlantique tempéré, dominée presque exclusivement par l'agriculture, les cultures arables et mixtes. Sur le plan administratif, 24 communes rurales sont entièrement intégrées dans la ZA, plus 8 autres (y compris la ville de Niort) qui ne sont que partiellement incluses. La zone couverte par la ZA comprend environ 29 000 habitants (en excluant la ville de Niort).

La ZA abrite une grande diversité d'agricultures : 15 exploitations agricoles sont gérées dans le cadre d'un programme d'agriculture de conservation, 45 fermes en agriculture biologique, parmi les 350 fermes conventionnelles, 60 % étant des systèmes agricoles mixtes, environ 200 ont été engagés dans des mesures agroenvironnementales (MAE) entre 2004 et 2017 et quelques douzaines selon les lignes directrices sur l'agriculture de précision. En outre, au moins cinq grandes coopératives opèrent actuellement sur la ZA. Depuis la désignation de la zone de protection spéciale (réseau NATURA 2000) en 2003, l'investigateur principal (PI) du LTSER a été chargé de la gestion des MAE, c'est à dire son élaboration et son animation renforçant les liens entre la recherche, les agriculteurs et les autorités locales.



## PROBLÉMATIQUE

La surveillance à long terme du site ainsi que les expérimentations sont assurées par le Centre d'Études Biologiques de Chizé situé au centre de la zone. Depuis 1994, les scientifiques ont monté des programmes de recherche qui impliquent des intervenants locaux : les agriculteurs, les apiculteurs, les autres citoyens et les autorités locales, pour relever les principaux défis socio-économiques tels que la conservation de la biodiversité, l'agriculture durable, la qualité de vie et les changements globaux. La plupart des programmes rassemble plusieurs acteurs locaux afin de déterminer leur perception des différents services écosystémiques et d'identifier les conflits sociaux potentiels liés à des services écosystémiques spécifiques dans des projets de recherche transdisciplinaires.

L'objectif global de cette plate-forme socio-écologique de surveillance à long terme est d'identifier des solutions efficaces pour le développement agricole et la conservation de la biodiversité dans les paysages agricoles. Trois objectifs principaux sont ciblés par la ZA. Le premier est la surveillance intensive des changements dans le paysage (pour exemple : l'occupation des terres de 19 000 champs est enregistrée chaque année), les principaux taxons présents (plantes, insectes, araignées, petits mammifères et oiseaux) et les pratiques agricoles. Le deuxième est l'étude expérimentale en conditions réelles de terrain : elle se fait avec des agriculteurs locaux, des fonctions et des services écosystémiques importants (la pollinisation), les cultures et le contrôle biologique (l'utilisation des pesticides), la production végétale et la valeur socio-économique de l'agriculture. Le troisième objectif est d'associer les acteurs à travers la recherche participative, la science citoyenne et la diffusion des résultats scientifiques.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Identifier des solutions efficaces conciliant développement agricole et conservation de la biodiversité dans des paysages résistants multifonctionnels
- Agroécologie à l'échelle du paysage
- Gouvernance adaptative
- Impacts du changement global sur la biodiversité dans les paysages agricoles
- Évaluation de la méta-population, des méta-communautés et du méta-écosystème

## CONTACTS ET ADRESSES

Vincent Bretagnolle  
breta@cebc.cnrs.fr

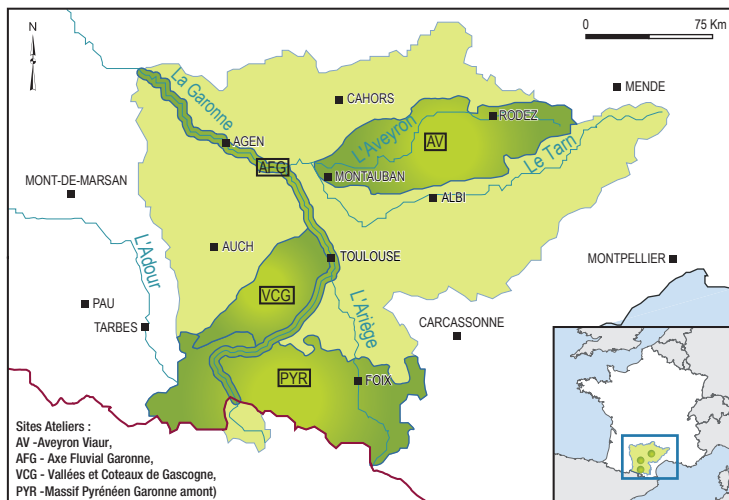
Sabrina Gaba  
sabrina.gaba@inra.fr

Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre  
Centre d'Études Biologiques de Chizé  
Villiers-en-Bois  
79360 Beauvoir-Sur-Niort – France

<http://www.za.plainevalsevre.cnrs.fr/>  
[https://twitter.com/ZA\\_PVS](https://twitter.com/ZA_PVS)



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le territoire de la ZA PYGAR se situe dans le Sud-Ouest de la France. Il s'étend des Pyrénées à la plaine de la Garonne, jusqu'en amont de l'estuaire de la Gironde. Il est composé de 4 sites ateliers le long d'un gradient amont-aval de la Garonne.

## DATE DE LABELLISATION

2017

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Au sein de ce territoire, les recherches sont structurées autour de 4 grands sites ateliers : Pyrénées, partie amont du bassin de la Garonne (PYR), Vallées et Coteaux de Gascogne, partie est (VCG), Axe Fluvial Garonne, de l'amont vers l'aval (AFG) et bassins de l'Aveyron et du Viaur (AV). Le couplage naturel entre deux massifs montagneux, les Pyrénées et le Massif Central, et le grand bassin versant de la Garonne situé au pied de ces deux massifs offre une possibilité originale d'aborder la question de la continuité / discontinuité entre l'amont et l'aval.

## PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

La ZA PYGAR a pour objectif d'étudier les dynamiques spatiale et temporelle des systèmes socio-écologiques (SSE). Elle étudie les interactions (nature, cinétique) entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques. PYGAR étudie les transitions spatiales au sein du gradient amont-aval de la chaîne pyrénéenne ou du Massif Central à la plaine de la Garonne. Le changement d'échelle et la modélisation s'appuient sur les compétences des laboratoires de la ZA PYGAR en analyse d'images satellites. Les SSE sont traités à différentes périodes depuis le dernier maximum glaciaire jusqu'à l'époque actuelle.

La ZA PYGAR a pour objectifs de :

- Quantifier les réponses des écosystèmes et socio-écosystèmes aux modifications de l'environnement,
- Comprendre les phénomènes complexes sur le long terme au sein de ces socio-écosystèmes,
- Acquérir des données pour développer des modèles théoriques et paramétrer/valider ces modèles,
- Agir comme une plateforme pour des études collaboratives et promouvoir l'interdisciplinarité,
- Fournir des données et une compréhension des systèmes écologiques pour la prise de décision et la gestion,
- Élaborer des scénarios d'appui à la mise en place de politiques publiques en matière d'environnement.



## THÉMATIQUES CLÉS

L'étude de la co-évolution de ces systèmes permet de caractériser leur résilience face aux changements globaux (climatiques, changement d'occupation des sols). La résilience des SES, définie comme leur capacité à résister à une perturbation ou à changer d'état, constitue la question transversale de la ZA PYGAR.

Les 3 questions posées par les équipes de la ZA PYGAR se situent à l'interface entre les systèmes socio-économiques et les systèmes écologiques.

- Quelle est la contribution respective du changement climatique et des activités socio-économiques aux modifications de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes ?
- Quelles sont les interactions entre les pratiques (agriculture, prélèvement des ressources : eau, minéraux, biodiversité, rejet d'effluents) et les services écosystémiques (approvisionnement en eau, régulation des flux, ravageurs des cultures, pollinisation) ?
- Quelles sont les relations entre les disponibilités en ressources, leur accès et la structuration des populations humaines sur des périodes historiques et pré-historiques ?



## CONTACTS ET ADRESSES

**Jean-Luc Probst**  
jean-luc.probst@ensat.fr

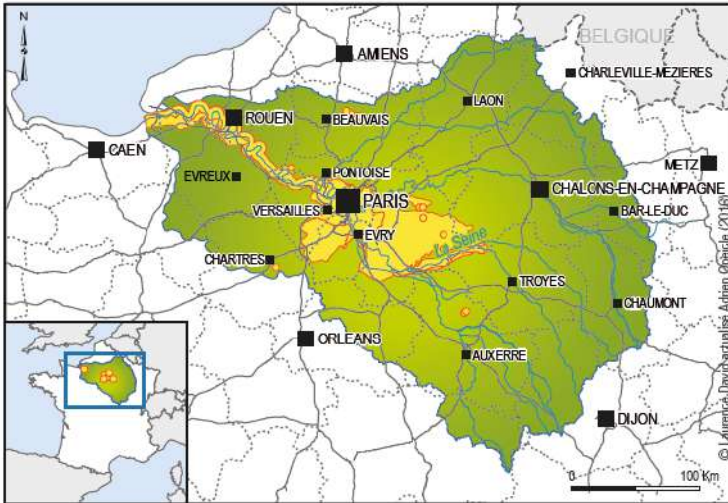
Campus ENSAT  
Avenue de l'Agrobiopole  
Auzeville Tolosane  
31320 Castanet Tolosan - France

**Annie Ouin**  
ouin@ensat.fr

<https://dynafor.toulouse.inra.fr/za/>



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Le bassin versant de la Seine (vert) avec ses sites-ateliers (jaune)

## DATE DE LABELLISATION

2000

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Le bassin de la Seine, 12 % du territoire national, correspond au quart de la population de la France, un tiers de sa production agricole et industrielle et plus de la moitié de son trafic fluvial. Les prises de conscience et investissements en termes d'épuration ont permis d'initier une tendance à l'amélioration de la qualité écologique du fleuve au cours des trois dernières décennies. Aujourd'hui, l'héritage en termes d'aménagement fluvial et de contamination, la dynamique des politiques agricoles et d'urbanisation, les orientations stratégiques autour du développement de l'axe Seine de Paris à la mer sont les éléments de contexte structurants pour la gestion environnementale du bassin versant. L'enjeu de territoire est de concilier ces éléments avec les attentes des populations en termes de qualité de cadre de vie, d'usages de l'eau ainsi qu'avec l'atteinte d'objectifs réglementaires en matière de gestion des milieux aquatiques.

## PROBLÉMATIQUE

L'objectif général, à partir de mesures de terrain et de modélisation, est de développer une vision d'ensemble du fonctionnement de ce système formé par le réseau hydrographique, incluant l'estuaire et le proche côtier, le bassin versant et la société humaine. L'ambition est aussi d'appuyer les politiques publiques en proposant les clefs d'une gestion cohérente du système, en s'inscrivant dans une analyse rétrospective et prospective de trajectoires socio-écologiques. La démarche repose sur 3 programmes de recherche, qui se rejoignent au sein de la Zone Atelier Seine pour développer cette vision :

- OPUR se focalise sur le milieu urbain en Ile-de-France et en particulier sur la problématique des cycles des contaminants (<https://www.leesu.fr/opur>),
- Le Piren-Seine s'intéresse aux problématiques du bassin versant et de l'axe Seine jusqu'à l'entrée de l'estuaire (<https://www.piren-seine.fr/>),

- Seine-Aval, soutenu par un groupement d'intérêt public (GIP Seine-Aval), aborde les problématiques du fonctionnement de l'estuaire et de la proche baie de Seine (<http://www.seine-aval.fr/>).

## THÉMATIQUES CLÉS

Au-delà des thématiques propres à chacun des 3 programmes de recherches, l'ambition est de faciliter l'étude globale du fonctionnement du système Seine en s'appuyant sur quelques thématiques structurantes en cours de développement. Cela concerne :

- Le bilan hydrologique et sédimentaire sous l'effet du changement climatique : modélisation couplée surface-souterrain sur le bassin versant en lien avec les forçages climatiques intégrant les systèmes karstiques, modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire et évolution morphologique sous forçage du niveau marin et des apports du bassin,
- Les cycles biogéochimiques et production primaire : suivi haute fréquence cohérent de Paris à la mer ; chaîne de modélisation des processus «bassin versant - fleuve - estuaire - baie de Seine» ; impacts de scénarios d'évolution du système agro-alimentaire sur le fonctionnement de l'écosystème côtier dont l'efflorescence d'algues toxiques,



- La contamination chimique et les perturbations associées : bilan et modélisation de la contamination, développement d'outils d'évaluation des perturbations fonctionnelles sur les organismes aquatiques le long du continuum,
- Les enjeux environnementaux du vaste projet de développement de l'Axe Seine, de Paris à la Mer : une approche prospective pluridisciplinaire autour de multiples questionnements croisés : impacts sur la morphologie du fleuve ; compensation écologique ; restauration du milieu, continuité écologique piscicole ; évolution de l'occupation des sols et ruissellement, risques inondations ; pression de l'évolution démographique sur les ressources en eau ; associer les différents publics pour favoriser un aménagement vertueux.

## CONTACTS ET ADRESSES

**Jean-Marie Mouchel**  
jean-marie.mouchel@upmc.fr

Laboratoire Metis  
Sorbonne Université  
4 place Jussieu  
BP 105  
75252 Paris cedex 05

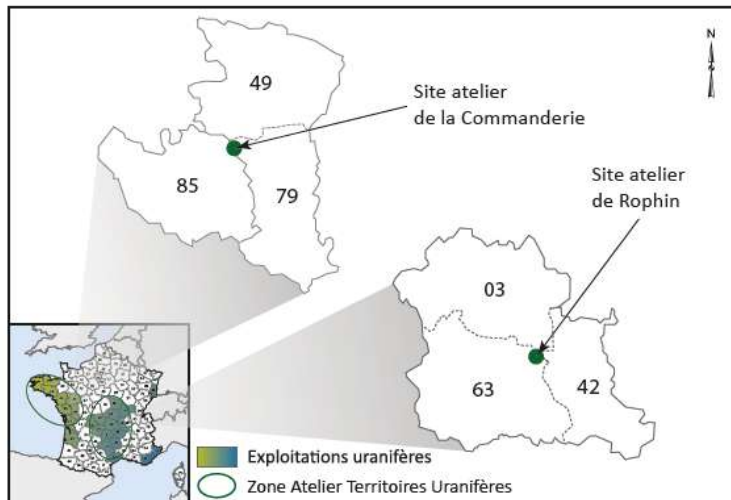
**Nicolas Bacq**  
nbacq@seine-aval.fr

**Ghassan Chebbo**  
chebbo@leesu.enpc.fr

<http://www.za-seine.fr>



## LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE



Arc Hercynien (Massif armoricain et Massif central)

## DATE DE LABELLISATION

2015

## OBJET D'ÉTUDE ET TERRITOIRE

Découverte il y a un peu plus d'un siècle, la radioactivité, symbole de modernité et de progrès avant la deuxième guerre mondiale, fait aujourd'hui peur car elle est devenue synonyme de mutations, de cancers ou de menace (accident ou attaque nucléaire). Cependant, la radioactivité est avant tout un phénomène naturel qui se retrouve au cœur de notre planète et dans certaines roches. De par leur géologie, les massifs armoricain et central sont des régions caractérisées par la présence de filons d'uranium à l'origine d'un niveau plus élevé de la radioactivité naturelle. Certains de ces filons ont donné lieu à une exploitation minière au cours de la deuxième moitié du vingtième siècle. A ce jour, peu d'études se sont penchées sur la reconversion de ces sites et sur les effets des faibles doses chroniques de radioactivité sur le vivant.



## PROBLÉMATIQUE

L'objectif de la Zone Atelier est de développer une démarche pluridisciplinaire confrontant les points de vue de biologistes, chimistes, géographes, écologues, géologues, médecins, physiciens, sociologues sur les questions que pose la vie dans des environnements caractérisés par une irradiation chronique d'origine naturelle ou naturelle renforcée.

Le programme de recherche de la ZA se décline autour de trois axes thématiques centrés sur les sciences humaines et sociales, la radiochimie et la biologie. L'organisation en ZA permet d'interagir aux interfaces entre ces thématiques de recherche et de développer ainsi des projets réellement interdisciplinaires avec une approche systémique. En effet, des interactions et rétroactions fortes existent entre les systèmes vivants, l'Homme et le devenir à long terme de la matière renfermant les radio nucléides.

Par son action (activité minière, réaménagements de grande ampleur, gestion post exploitation), l'Homme agit sur les milieux : il crée de nouveaux types d'habitats plus ou moins favorables à la vie et agit sur les devenir à long terme de la matière qui renferme les radionucléides (maîtrise des écoulements d'eau, mise en place de couverture de confinement des matériaux radioactifs...). De même, la présence de radioactivité conditionne pour partie les rapports de l'Homme à son environnement en termes d'appréhension du risque et de mise en place de processus de prévention (mise en place de servitudes, mobilisation citoyenne...). Enfin, si la radioactivité a un effet sur le vivant, le vivant peut également agir sur le devenir des radionucléides pour lesquels l'action bactérienne, par exemple, peut induire des modifications de la spéciation.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Sociétés et territoires uranifères
- Caractérisation, comportement et transfert des radionucléides
- Effet des radiations sur les systèmes vivants

## CONTACTS ET ADRESSES

**Vincent Breton**  
breton@clermont.in2p3.fr

**Patrick Chardon**  
patrick.chardon@clermont.in2p3.fr

**Téléphone Sime-Ngando**  
telesphone.sime-ngando@univ-bpclermont.fr

Laboratoire Microorganismes:  
Génome & Environnement  
Université Blaise Pascal  
Complexe Scientifique des Cégeaux  
24 avenue des Landais, BP 80026  
63171 Aubière Cedex - France

<http://zatu.org>







## DES OBSERVATOIRES SUR LES INTERACTIONS HOMMES-MILIEUX

Les Observatoires Hommes-Milieu (OHM) sont des dispositifs de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS. Le premier fut créé en 2007. Il y en a aujourd'hui treize, répartis en France métropolitaine (6), ultramarine (2) et à l'étranger (5).

Ils se consacrent à l'étude des systèmes anthropisés affectés par des crises socio-écologiques issues du Changement Global et de la Mondialisation. Ils sont construits sur :

- un événement fondateur d'origine humaine bouleversant l'intégralité des fonctionnements environnementaux du territoire considéré ;
- la réunion des Sciences de la Terre, de la Vie, de l'Homme et de la Société dans une approche interdisciplinaire dite "d'Écologie Globale" abordant la complexité des systèmes étudiés ;
- la mise en œuvre de recherches scientifiques pour comprendre ces phénomènes et éclairer au mieux les décideurs politiques, économiques et les acteurs citoyens dans leurs choix pour la résolution des crises environnementales.

## DES PROBLÉMATIQUES CO-CONSTRUITES EN ÉCOLOGIE GLOBALE

La création d'un OHM repose sur une co-construction de la problématique socio-écologique du territoire par l'ensemble des sciences de l'environnement (SE). Cette étape permet et construit l'interdisciplinarité requise pour la mise en œuvre de l'Écologie Globale. Ainsi les thématiques-clefs d'un OHM sont-elles élaborées collégalement lors de sa construction, en prenant en compte les demandes de la société.

Chenorkian, R., 2020, Conception et mise en œuvre de l'interdisciplinarité dans les Observatoires hommes-milieu (OHM, CNRS). *Nature Science Société*, 28, 3-4, 278-291

Chenorkian, R., 2019, Changements, transitions et contextes écosystémiques très anthropisés, in Bedouret, D, et al. : Actes du colloque « Changements et transitions : enjeux pour les éducations à l'environnement et au développement durable », Toulouse, 7, 8 et 9 novembre 2017.

Chenorkian, R, Abbadie, L, 2017, Is resilience still relevant, in Euzen, A., Laville, B., Thiébaud, S., *Adapting to climate change*, Paris, EdiSens.

Chenorkian, R., 2014, Éléments constitutifs des Observatoires Hommes-Milieu, origine et évolutions, in Chenorkian, R. Robert, S., *Les interactions hommes-milieu. Questions et pratiques de la recherche en environnement*, Paris, Quae.

Chenorkian R., 2012, Les Observatoires Hommes-Milieu : un nouveau dispositif pour une approche intégrante des interactions environnements-sociétés et de leurs dynamiques, *Sud-Ouest Européen*, n° 33, p. 3-10.

## DES OBSERVATOIRES EN ÉCOLOGIE GLOBALE

La complexité des systèmes étudiés au sein d'un OHM pose les scientifiques qui les étudient en observateurs de leur fonctionnement. Les dispositifs d'observations s'y développent en interactions avec l'ensemble des disciplines des sciences de l'environnement. Ils ne sont donc pas des systèmes d'observation classiques même s'il peut aussi s'en développer en leur sein.

## DES CRITÈRES DE CONSTRUCTION RIGoureux

Tout OHM est fondé sur un ternaire nécessairement d'origine anthropique :

- Un cadre socio-écologique, dit aussi fait structurant, issu des caractéristiques du lieu considéré,
- Un événement fondateur, qui correspond à un événement passé, actuel, voire à venir, qui bouleverse cette organisation et perturbe l'essentiel des fonctionnements écosystémiques,
- Un objet focal produit de la rencontre de ces deux premiers items, et point de centrage commun à toutes les sciences de l'environnement, il est l'objet d'étude unique et partagé.

## MISE EN ŒUVRE D'UNE NOUVELLE INTERDISCIPLINARITÉ

L'ensemble du dispositif OHM/DRIIHM et son ingénierie permettent aux disciplines d'être ouvertes, attentives aux autres recherches. La convergence de tous vers le même objet permet à chacun de s'enrichir des apports des autres. Cet esprit d'ouverture (indisciplinarité) et l'intégration possible des résultats d'autres disciplines conduit à une "disciplinarité éclairée" beaucoup plus aisée à obtenir et mettre en œuvre qu'une interdisciplinarité stricto sensu.

## DES RECHERCHES CENTRÉES SUR L'ÉCHELON LOCAL

Les OHM développent leur activité à l'échelon local, qui est le niveau de l'objet observé et celui où se produisent actions et réactions sociétales. Si toutes les échelles de temps et d'espace sont prises en compte dans le développement de la recherche, c'est sur cet échelon local que reposent la conception et la mise en œuvre des projets de recherche réalisés dans un OHM. C'est aussi là que se développent l'essentiel des interactions recherche-société, de la construction de la recherche à la restitution des résultats.

## POUR ALLER PLUS LOIN



## CONTACTS

Stéphane Blanc (Responsable Scientifique et Technique DRIIHM) : stephane.blanc@cnrs-dir.fr

Robert Chenorkian (Conseiller scientifique INEE - OHM) : robert.chenorkian@univ-amu.fr

Corinne Pardo (Adjointe au Responsable Scientifique et Technique DRIIHM) : corinne.pardo@univ-amu.fr

Mathieu Massaviol (Chargé de projet Informatique et Données) : mathieu.massaviol@univ-amu.fr

## COORDONNÉES

INEE- CNRS

3 rue Michel-Ange

75794 Paris Cedex 16

<https://www.driihm.fr/>



# Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieux

Le LabEx DRIIHM est lauréat du Programme d'Investissements d'Avenir de la France en 2012-2019. Il a été renouvelé pour 5 ans au 1er Janvier 2020.

Le DRIIHM a été construit pour faire fonctionner et animer la communauté des Observatoires Hommes-Milieus (OHM), qu'il regroupe dans un même ensemble, avec leurs bases communes et leur diversité.

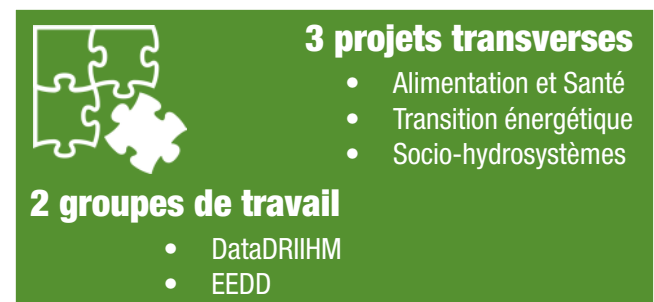
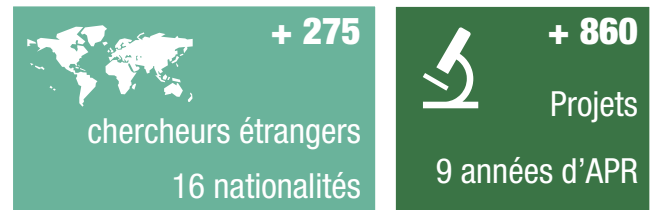
Il opère des transversalités et favorise les interactions propices à l'émergence de l'interdisciplinarité requise pour l'étude des socio-écosystèmes complexes à travers divers outils :

- Des appels à projets de recherche exploratoires.
- Des projets inter-OHM et transverses où l'approche comparative apporte des connaissances originales ou de nouveaux concepts dans la compréhension de socio-écosystèmes soumis à des crises environnementales.
- Des contrats doctoraux et post-doctoraux.
- Des ouvrages de synthèse sur des problématiques partagées.
- Des séminaires annuels de restitution des projets OHM et des séminaires thématiques.
- Des actions transverses autour de la gestion et de la mise à disposition des données via le groupe DATA-DRIIHM : mise en place d'outils mutualisés de valorisation, de visualisation et de partage des données de la recherche (GeoDRIIHM, PhotoDRIIHM, DRIIHM-HAL, Timeline, Frise chronosystémique...).
- Le projet SO-DRIIHM (ANR 2020-2023) vient conforter ces actions en sensibilisant la communauté au partage et à l'ouverture des données et en intégrant les outils existants dans la co-construction d'une e-infrastructure ergonomique, interoperable offrant notamment un accès facilité aux données.
- Des transferts vers la société et plus particulièrement vers les jeunes générations en soutenant projets et actions en Éducation à l'Environnement et au Développement Durable : transposition didactique des résultats de la recherche OHM vers des supports pédagogiques à destination de la sphère enseignante (primaire et secondaire) et diffusion desdits supports sur un site dédié "2E3D".

Le DRIIHM est construit pour faciliter les relations d'interdisciplinarité entre toutes les sciences de l'environnement :

- En assurant une totale mixité de participation pour les disciplines, les participants (chercheurs et enseignants-chercheurs, doctorants, post-doctorants) et leurs tutelles (Organismes de recherche, Universités, Grandes Écoles...).
- En associant la société civile, notamment à la co-construction des dispositifs et aux retours des résultats de la recherche pour assurer l'adéquation et la compréhension entre les recherches menées et les attentes des acteurs, des décideurs politiques, économiques... en éclairant ainsi leurs choix pour les actions relevant de leur compétence.
- En générant activement cette attitude d'ouverture d'esprit que l'on qualifie d'indisciplinarité qui permet les échanges et interactions entre les disciplines et conduit à la construction de l'interdisciplinarité apte à répondre à la complexité des systèmes étudiés.

## Les chiffres-clés du DRIIHM

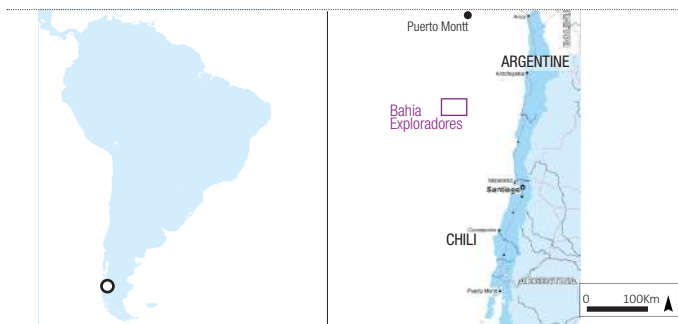


### CONTACTS

Stéphane Blanc (Responsable Scientifique et Technique) : stephane.blanc@cnrs-dir.fr  
Robert Chenorkian (Conseiller scientifique INEE - OHM) : robert.chenorkian@univ-amu.fr  
Corinne Pardo (Adjointe au Responsable Scientifique et Technique) : corinne.pardo@univ-amu.fr  
Mathieu massaviol (Chargé de projet Informatique et Données) : mathieu.massaviol@univ-amu.fr

### COORDONNÉES

INEE- CNRS  
3 rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16  
<https://www.driihm.fr/>



## CRÉATION

Mars 2016

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

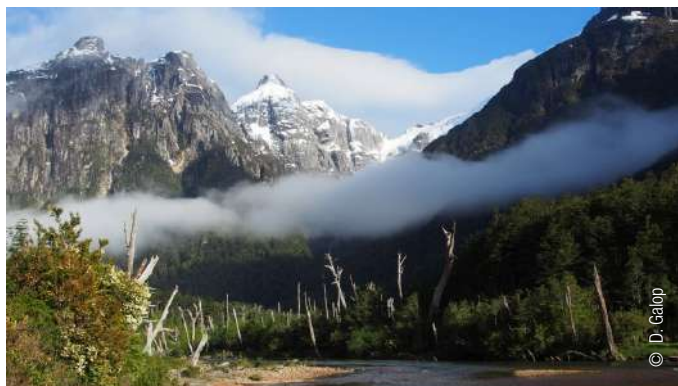
A environ 300 km au sud de la ville de Coyhaique, l'OHMI Patagonia-Bahia Exploradores est situé dans la région d'Aysén en Patagonie chilienne, à l'embouchure du fleuve "Exploradores" et des fjords du Pacifique à l'écart de toute implantation humaine. Cette situation en marge a permis la préservation d'un écosystème unique dont le principal facteur de forçage reposait jusqu'alors sur l'influence des conditions climatiques.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Création en 2009 d'une voie de communication impactante entraînant l'accélération, l'intensification et l'expansion spatiale du développement d'une économie touristique et productive (sylviculture, pastoralisme, aquaculture intensive, exploitation minière).

## THÉMATIQUES CLÉS

- Dynamiques territoriales de systèmes socio-écologiques
- Impact du changement climatique et dynamiques de la biodiversité dans un contexte de mutation rapide
- Activités productives (agropastoralisme, aquaculture intensive, exploitations sylvicole et minière) et contaminations
- Invasions biologiques
- Développement durable dans des environnements extrêmes



© D. Galop

## TERRITOIRE

Constitué d'un espace maritime austral et de forêts à *Notofagus*, le territoire de l'OHMI Patagonia-Bahia Exploradores est localisé en zone périglaciaire et soumis aux doubles influences du "Campo Hielo Norte" (deuxième glacier continental de l'hémisphère sud) et du Pacifique sud. L'ensemble de ces caractéristiques font de ce secteur un territoire d'exception, tant au niveau environnemental, qu'au niveau des menaces qui le concernent en raison du changement climatique actuel. C'est à ce titre que l'ensemble de la zone est l'objet de mesures de protections marquées par la présence de plusieurs parcs nationaux (Parc national de la lagune San Rafael, Réserve de Biosphère).



© D. Galop

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Ce territoire offre un cadre idéal pour l'observation des transformations générées par un processus d'anthropisation en cours : celui du développement d'une économie touristique et productive associée au développement de voies d'accès terrestres et maritimes dont les impacts sur un écosystème jusqu'alors préservé seront croissants.

L'OHMI veillera d'une part à acquérir des connaissances globales sur la zone de Bahia Exploradores et son aire d'influence et d'autre part à contribuer à l'aide à la décision en matière de conservation et de développement durable dans un contexte de mutation territoriale, dans le cadre d'une démarche intégrée en articulation étroite avec les acteurs institutionnels nationaux et le tissu socio-économique local (industrie, tourisme, éleveurs).



© D. Galop

## CONTACTS

Alejandro SALAZAR-BURROWS (Directeur)

@ asalazab@uc.cl

Didier GALOP (Co-Directeur)

@ didier.galop@univ-tlse.fr

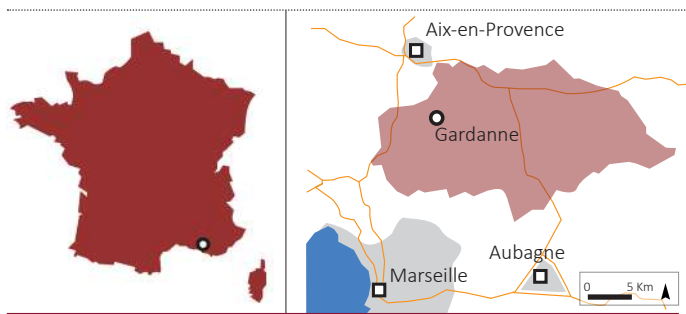
<https://ohm-bahia-exploradores.in2p3.fr/>

## COORDONNÉES

Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Campus San Joaquín - Avda. Vicuña Mackenna 4860  
Macul, Santiago, CHILE

UMR 5602 GEODE - Maison de la recherche  
Université Jean Jaurès  
5, allées A. Machado - 31058 Toulouse





## CRÉATION

Octobre 2007

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Exploitation minière (lignite) autour de la ville de Gardanne pendant près de deux siècles, développements industriel et urbain associés.

## ÉVÈNEMENT FONDATEUR

L'arrêt brutal de l'exploitation minière en 2003 a profondément marqué le territoire en remettant en cause son histoire industrielle et son organisation économique. Les conséquences s'en font toujours sentir aujourd'hui, en particulier avec la fermeture programmée de la dernière tranche charbon de la centrale thermique et se poursuivent avec les interrogations concernant le devenir de l'industrie de l'alumine ; mines, centrale électrique et production d'alumine font partie du même système économique-industriel qui marque ce territoire.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Devenir post-mine, industrialisation
- Polluants, résilience, santé
- Perception de la qualité de l'environnement
- Dynamiques urbaines (métropolisation) et utilisation de l'espace
- Biodiversité, paysages et impacts miniers



© J.-C. Raynal

## TERRITOIRE

L'ancien bassin charbonnier de Provence, également appelé bassin minier de Gardanne, constitue le territoire d'étude de cet Observatoire. Situé dans l'est du département des Bouches-du-Rhône, entre Marseille et Aix-en-Provence, il concerne dix-sept communes rassemblant près de 110 000 habitants en 2015. Durant près de deux siècles, l'unité de cet espace s'est forgée autour de l'exploitation du lignite et de l'industrialisation induite par la mine. Encadré au nord par le massif de la Sainte-Victoire et au sud par la chaîne de l'Étoile ainsi que par la montagne du Régagnas, paysages emblématiques de la Provence, cet espace est caractéristique des dynamiques périurbaines et industrielles en zone méditerranéenne. Ces dynamiques, souvent contradictoires, ont été particulièrement influencées par l'arrêt définitif de l'exploitation minière au début des années 2000.



© J.-C. Raynal

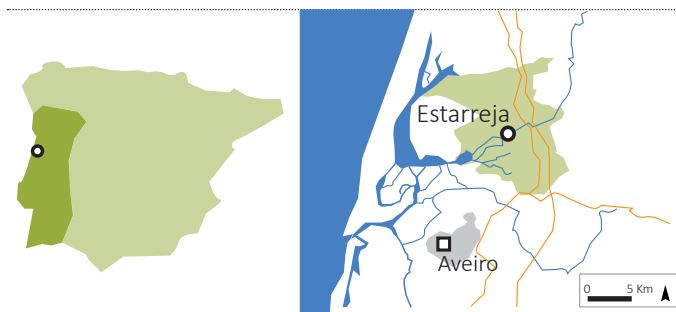


© J.-C. Raynal

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Localisé dans l'orbite de l'aire métropolitaine Marseille-Aix, ce territoire connaît aujourd'hui une phase de transition. Il est confronté à des problèmes multiples : la gestion de l'héritage minier et la reconversion économique ; les enjeux de la métropole Aix-Marseille Provence et les changements de gouvernance ; le maintien de l'agriculture et la préservation de l'environnement ; les conflits pour l'usage de l'espace ; les pressions sur la qualité des milieux et des paysages.

Dans ce contexte métropolitain, l'objet de l'OHM est d'étudier l'adaptation à la nouvelle donne créée par l'arrêt des charbonnages : conséquences environnementales et sociales de l'arrêt de la mine ; acceptabilité et devenir des grands établissements industriels ; habitabilité du territoire et santé ; gouvernance et gestion environnementale (enjeux de la production d'alumine et de la gestion des résidus) ; permanences et innovations en matière énergétique (conversion de la centrale thermique à charbon en centrale biomasse).



## CRÉATION

Mars 2010

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Développement d'un complexe d'industries chimiques (sulfate d'ammonium, acide nitrique, nitrate d'ammonium, résines synthétiques) ayant généré une intense pollution du milieu depuis les années cinquantes et pendant près d'un demi-siècle, à proximité de la lagune d'Aveiro.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Mise en œuvre de pratiques vertueuses par les industriels à partir de 1990.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Écotoxicologie
- Dynamiques des polluants, résilience et remédiation
- Environnement, santé et dynamique des populations
- Ecosystème lagunaire et activité industrielle
- Perception sociale des risques liés à l'activité industrielle



© A.-M. Guihard-Costa

## TERRITOIRE

Le territoire étudié correspond à la commune d'Estarreja, située dans la Région Centre du Portugal (district d'Aveiro). La commune a été soumise à une pollution industrielle intense depuis le début des années 50, en raison de la présence du deuxième plus important complexe d'industries chimiques du pays, produisant principalement du sulfate d'ammonium, de l'acide nitrique et du nitrate d'ammonium, mais également des résines synthétiques (PVC). La zone industrielle se situe à proximité de la plus grande lagune d'eau saumâtre du Portugal, milieu écologiquement riche, habitat naturel de nombreuses espèces aquatiques et terrestres. L'activité industrielle a produit de grandes quantités de déchets toxiques solides, déchets qui ont été stockés, jusqu'en 1986, dans des lieux inadaptés. De plus, jusqu'en 1975, des effluents liquides chargés en éléments potentiellement toxiques pour les écosystèmes et pour la santé humaine étaient également rejetés dans les nombreux canaux de drainage de cette zone.



© A.-M. Guihard-Costa

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Au cours des années 1990, d'importantes innovations technologiques ont permis de réduire considérablement l'émission de polluants par les usines chimiques locales. De même, au cours de cette décennie, un certain nombre d'interventions de réhabilitation ont permis une réduction significative du passif environnemental, tant au niveau des résidus solides que des effluents liquides. Cependant, de nombreuses lacunes subsistent dans la connaissance de l'évolution de l'environnement ; elles justifient la nouvelle approche pluridisciplinaire qui est celle de l'OHMI Estarreja.

L'OHMI Estarreja a pour objectif d'étudier les effets multiples de l'activité industrielle sur la relation homme-milieu, en prenant en compte la dimension temporelle, marquée par une amélioration significative des processus technologiques industriels, ainsi que par des changements dans la structure sociale de la population et dans les modes de vie. La perception et l'implication des populations locales est également pour l'OHMI un enjeu primordial.



© A.-M. Guihard-Costa

## CONTACTS

Jean-Philippe BEDELL (Directeur)  
@ JeanPhilippe.BEDELL@entpe.fr

Eduardo-A. FERREIRA DA SILVA (Co-Directeur)  
@ eafsilva@ua.pt

Anne-Marie GUIHARD-COSTA : am.guihard@wanadoo.fr

## COORDONNÉES

Departamento de Geociências,  
Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago  
3810-193 Aveiro Portugal

<https://www.ohm-estarreja.in2p3.fr/>





## CRÉATION

Juillet 2018

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Le cadre socio-écologique de cet OHM est issu de la construction en 1970-1977 de la centrale nucléaire de Fessenheim (mise en exploitation en 1978) avec toutes les conséquences écologiques, économiques et sociales qui en ont résulté et profondément marqué ce territoire (cf. infra).

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Au-delà des annonces politiques et des débats générés, l'événement fondateur est la décision de fermeture de la centrale (CA d'EDF du 6 avril 2017). Prélude à son démantèlement, l'arrêt du réacteur n°1 est intervenu le 22 Février 2020 et celui du second le 29 Juin 2020.

## THÉMATIQUES CLÉS

Elles sont centrées sur les conséquences écologiques, économiques et sociales faisant suite à l'annonce de la fermeture de la Centrale. Une attention toute particulière sera portée aux questions des transitions énergétiques et écologiques, aux conséquences sur la société et son organisation socio-environnementale, avec un focus sur les évolutions urbaines et sur les conséquences de l'événement fondateur sur leurs dynamiques. Un important volet TO (état socio-écologique de l'objet focal 'Fessenheim' au moment de la décision de fermeture de la Centrale) est également mis en œuvre.

## TERRITOIRE

Il est constitué des zones impactées sur les plans écologiques, économiques et sociaux, par la construction, le fonctionnement et la fermeture de la centrale. D'extension nécessairement variable selon les champs considérés, il sera en premier abord calé sur le rayon de 30 km autour de la centrale, qui caractérise la zone d'astreinte de ses employés.

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

La localisation de ce socio-écosystème, aux frontières de l'Allemagne et de la Suisse, dans une région fortement industrialisée en bordure du Rhin, en fait un objet d'étude unique.

La fermeture de la centrale de Fessenheim crée un contexte de rupture, mêlant sur le territoire des héritages anciens, écologiques, sociétaux et infrastructurels, à des logiques économiques contemporaines inédites dont l'annonce de politiques de transition énergétique fortes. Cette décision conduit à des modifications majeures de la structure socio-économique des communes riveraines, qu'il faudra considérer dans le cadre de la région du Rhin Supérieur. L'objectif est de comprendre comment interviendront et quelles seront matériellement les conséquences environnementales, économiques et sociales de cette décision de fermeture nourrie par un mélange idéologique complexe empli de contradictions. Les recherches de l'OHM concerneront principalement la caractérisation des dynamiques socio-environnementales qui ont marqué et marqueront le territoire suite à l'événement fondateur. Sont identifiés des focus sur les polluants potentiellement issus des activités, l'arrêt et le démantèlement de la centrale, ainsi que leurs conséquences sur les paysages, sur les recompositions des dynamiques socio-économiques, écologiques et en termes de santé publique. Une attention particulière sera portée sur l'intégration de la problématique des énergies nouvelles et sur ses conséquences.



## CONTACTS

Dominique BADARIOTTI (Directeur) : dominique.badarotti@live-cnrs.unistra.fr

Fanny GREULLET (Coordinatrice) : fanny.greullet@live-cnrs.unistra.fr

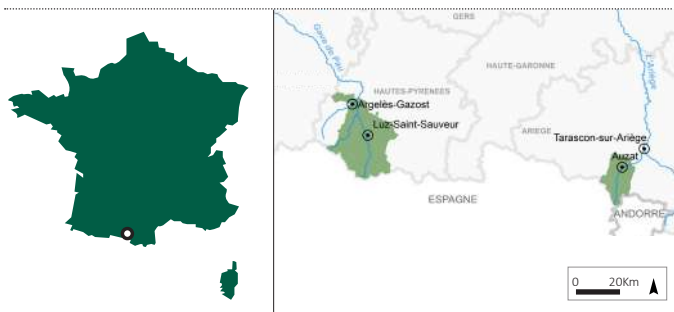
<https://ohm-fessenheim.fr/>

## COORDONNÉES

UMR 7362 LIVE

Faculté de géographie et d'aménagement  
3 rue de l'Argonne  
67000 Strasbourg





## CRÉATION

Mars 2009

## CADRE SOCIO-ÉCOSYSTÉMIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Résultat d'une situation de surexploitation du milieu montagnard suivi d'un abandon progressif de l'ensemble des activités agro-sylvo-pastorales et industrielles.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Arrêt des industries dont l'usine d'alumine Pechiney d'Auzat en 2003 et déclin des activités agro-pastorales.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Changement global et dynamique de la biodiversité
- Évolution agro-pastorale et patrimoines naturels
- Dynamiques des occupations humaines et nouvelles activités économiques et culturelles (tourisme)
- Ressource en eau
- Développement durable



© D. Galop

## TERRITOIRE

L'OHM Pyrénées s'intéresse à des territoires de montagne soumis à une forte déprise humaine depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Les terrains d'étude recouvrent la haute vallée du Vicdessos en Ariège et les vallées des Gaves dans les Hautes-Pyrénées, et s'étendent depuis le cœur des vallées jusqu'aux sommets supérieurs à 3 000 mètres d'altitude. Soumises à une intense pression minière, métallurgique et agropastorale depuis plus d'un millénaire, ces vallées sont aujourd'hui le siège d'un processus d'abandon constitué par l'arrêt définitif de toute activité industrielle et par la réorientation des pratiques, notamment le développement des activités touristiques.



© G. Parcio

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

La transition entre deux modes d'usage et d'occupation de l'espace montagnard crée un contexte de rupture, mêlant sur le territoire des héritages anciens (pollutions, dégradation des sols, etc.), des dynamiques naturelles nouvelles et des logiques économiques contemporaines inédites. Dans ce contexte, l'OHM s'intéresse, sur la longue durée et avec une vision prospective, à cinq phénomènes influant sur le territoire et l'environnement : les dynamiques de la biodiversité dans un environnement en complète mutation et aux prises avec les effets du réchauffement climatique ; l'agro-pastoralisme qui tend à disparaître malgré sa valeur patrimoniale ; l'étalement urbain qui gagne les vallées et introduit de nouvelles dynamiques socio-économiques et culturelles ; la question de la ressource en eau qui est également pourvoyeuse de revenus tirés de l'hydroélectricité, dans un contexte de diminution des apports neigeux et de sécheresses répétées ; l'essor du tourisme et sa relation avec les patrimoines naturels et culturels.



© A. Loyer





## CRÉATION

Janvier 2016

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Développement d'un complexe urbano-portuaire dans le contexte insulaire des Petites Antilles.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

A partir des années 2010, accélération des dynamiques urbano-portuaires dans une perspective de développement durable du territoire Guadeloupéen.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Evolution du socio-écosystème ville-port
- Circulation et représentation des savoirs maritimes
- Gestion collective de la biodiversité
- Résilience d'écosystèmes emblématiques
- Modélisation des socio-écosystèmes



La Guadeloupe est un archipel constitué de deux îles principales séparées par un étroit bras de mer associé à plusieurs terres voisines, Marie-Galante, l'archipel des Saintes et La Désirade. Cette Région Ultrapériphérique Européenne (RUP) fait partie de l'un des « hotspots » mondiaux de la biodiversité avec un taux d'endémisme important, et des écosystèmes riches et variés (récifs coralliens, mangroves et herbiers) qui sont particulièrement sensibles aux pressions anthropiques. Ce territoire antillais qui présente une exceptionnelle richesse culturelle, historique et patrimoniale est aussi un haut lieu touristique.



## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Au sein d'un territoire insulaire, l'évolution des infrastructures portuaires et de leurs fonctions ouvre des réflexions sur les interactions ville-port et sur la mise en relation entre des espaces à anthropisation très différenciés. L'OHM cherche à analyser les manières dont la biodiversité est intégrée au système urbano-portuaire, à la permanence ou aux transformations des pratiques et savoirs locaux, aux dynamiques engendrées par la requalification des territoires guadeloupéens et à l'évolution de leurs usages. La recomposition des pratiques et activités littorales et la gestion des espaces sont des questions centrales. La perception des modifications de la façade maritime et l'implication des populations locales sont également un enjeu primordial. L'OHM vise aussi à observer et à analyser sur le long terme les transformations paysagères, les enjeux d'innovations socio-économiques et l'évolution des rapports entre acteurs et utilisateurs du littoral.

## TERRITOIRE

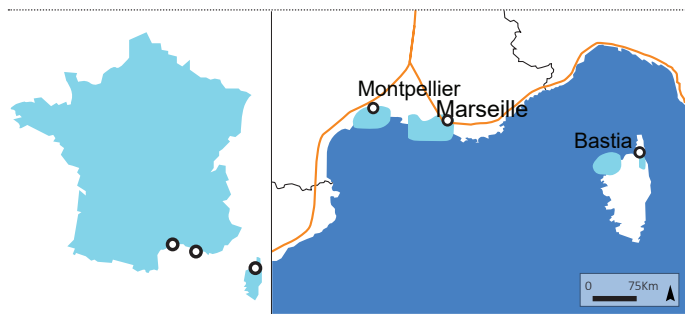


## CONTACTS

Pascal-Jean LOPEZ (Directeur)  
@ pascal-jean.lopez@mnhn.fr  
- 01 40 79 37 02  
- 06 73 35 90 38

## COORDONNÉES

UMR 7208 BOREA  
43 rue cuvier, 75005, Paris, France  
Campus de Fouillole, 97159 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe  
<https://ohm-littoral-caraïbe.in2p3.fr/>



© S. Robert

## CRÉATION

Janvier 2012 - conjointement par l'Institut Ecologie et Environnement et l'Institut des Sciences Humaines et Sociales du CNRS

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Pression anthropique massive (urbanisation, tourisme, transports) accentuée depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle sur le littoral méditerranéen, avec les modifications induites sur les comportements et les usages.

## ÉVÈNEMENT FONDATEUR

Prise de conscience d'une nécessité de gestion durable du littoral dans les années 1990 et apparition de la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) depuis le début des années 2000.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Qualité des milieux (eaux côtières, bassins-versants, air, sols, biocénoses, ...)
- Gestion et protection des espaces et des milieux (origines et effets, conflits, effet réserve, ingénierie écologique, planification de l'espace) ;
- Services éco-systémiques et aménités environnementales ;
- Risques (naturels, industriels, technologiques, sanitaires) et fonctionnements des territoires (prévention et traitement du risque, planification, remédiation) ;
- Qualité de vie (santé, niveau de vie, démographie, identité).



© P. Monfort

## TERRITOIRE

L'observation et la recherche menées dans le cadre de cet OHM concernent le littoral méditerranéen de la France, étudié à travers trois sites composant un large gradient d'urbanisation et de pression anthropique. Du plus urbanisé au moins soumis aux pressions humaines, il s'agit de : l'agglomération marseillaise au sens large, depuis les bassins portuaires de Fos-sur-Mer à l'ouest jusqu'à La Ciotat à l'est ; le golfe d'Aigues-Mortes, de Sète au Grau du Roi, y compris les lagunes littorales et les bassins versants associés ; les rivages de Balagne et de la périphérie sud de Bastia, en Haute-Corse. Les espaces et milieux étudiés correspondent à l'interface entre les domaines marin et terrestre, c'est-à-dire le rivage mais également les zones terrestres et marines qui s'influencent mutuellement de part et d'autre du trait de côte, tant sur les plans écologiques, hydrologiques ou sociétaux.



© C. Blondy

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Foyer touristique majeur, haut lieu de l'économie résidentielle, site de plusieurs des plus grandes villes du pays et d'un des principaux ports de la Méditerranée, le littoral méditerranéen français présente une forte urbanisation côtière, tout en conservant des espaces naturels remarquables par leur biodiversité et leur bon état actuel. Soumis à de multiples pressions pour être davantage aménagé et permettre l'accueil de populations nouvelles (résidents ou touristes), il est également l'objet de conflits d'usages et de controverses quant aux options à privilégier pour sa gestion et la planification de son devenir. Au cours des années 2000, l'émergence du concept de gestion intégrée de la zone côtière (GIZC) offre un cadre opérationnel nouveau. Il permet aux acteurs locaux de s'emparer de la question littorale et de s'engager dans des projets de territoires associant la terre et la mer et autorisant des innovations pour mieux encadrer l'urbanisation littorale qui se poursuit. L'OHM propose d'observer cette situation à travers cinq thèmes principaux : la qualité des milieux ; la gestion et la protection des espaces et des milieux ; les services éco-systémiques et les aménités environnementales ; risques et fonctionnements des territoires ; la qualité de vie.

## CONTACTS

Patrick MONFORT (Directeur) : patrick.monfort@umontpellier.fr  
 Samuel ROBERT : samuel.robert@univ-amu.fr  
 Caroline TAFANI : tafani\_c@univ-corse.fr  
 Vanina PASQUALINI : pasqualini@univ-corse.fr  
 Stéphane GHIOTTI : stephane.ghiotti@univ-montp3.fr

## COORDONNÉES

UMR 5569 HydroSciences Montpellier  
 Equipe «Pathogènes Hydriques Santé Environnement»  
 UFR Pharmacie, Unité de Bactériologie  
 15 Avenue Charles Flahaut,  
 BP 14 491, 34093 Montpellier Cedex 05 - France  
<http://www.ohm-littoral-mediterraneen.fr/>





## CRÉATION

Octobre 2012

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Le contexte climatique, écologique, économique, social et culturel de l'Arctique et la volonté des communautés résidentes de maîtriser leur développement, la gestion de leurs ressources et leur territoire.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Le lancement du Plan Nord, vaste programme de développement socio-économique du Grand Nord mis en place par le gouvernement du Québec dans le contexte des impacts cumulatifs du changement global (climatique, économique, social).

## THÉMATIQUES CLÉS

Co-construites lors du séminaire de lancement de novembre 2013, elles se regroupent en 5 axes prioritaires :

- Le développement industriel, le développement durable et les sources d'énergie renouvelable ;
- La sécurité et l'autosuffisance alimentaire ;
- La santé et le bien-être chez les Inuit et leurs liens avec l'environnement ;
- Les changements climatiques, les risques naturels et les vulnérabilités des utilisateurs des parcs du Nunavik, des lieux protégés et d'intérêts culturels ;
- Les savoirs traditionnels, le patrimoine, les échanges intergénérationnels et la perception par les Inuit de leur territoire.



Serres de Kuujuaq (a), pour lesquelles un système de stockage innovant a été mis en place (b) afin d'allonger la saison de culture (c). Un suivi des performances du système est permis grâce à une instrumentation spécifique développée dans le cadre du projet (d)

## TERRITOIRE

Les recherches de l'OHMi sont menées sur un territoire couvrant le tiers nord de la province du Québec à l'est du Canada, le Nunavik. Le territoire de 443 km<sup>2</sup> a été créé dans



le cadre de la Convention de la Baie James et du Nord québécois en 1975. Le climat de Nunavik est de subarctique à arctique. Au-delà du 58<sup>e</sup> parallèle et de la limite des arbres, le territoire est recouvert de toundra herbacée en zone de pergélisol continu. Plus au sud, c'est une zone de transition entre toundra forestière et toundra arbustive en zone de pergélisol discontinu.

La population du Nunavik de 13 188 habitants est à 89,5 % Inuit et se concentre dans 14 villages côtiers allant de 209 à 2 754 habitants par village. 67 % d'entre eux parlent Inuktitut ; s'ajoutent à cela la réserve de la Première Nation Crie de Whapmagoostui et des terres de chasse et de trappe exclusives de la Première Nation Naskapi, de même qu'une partie du Nitassinan, le territoire innu revendiqué.

## PROBLÉMATIQUES SOCIO-ÉCOLOGIQUES

Le gouvernement du Québec a lancé en mai 2011 le « Plan Nord » qui vise le développement économique du grand Nord tout en favorisant une approche de développement « intégrée et durable ». Des discussions ont constamment lieu entre les collectivités locales, les administrations publiques, les organisations gouvernementales et les industries pour que leurs efforts convergent vers la réalisation de solutions réalistes, qui satisferont les besoins du Nord et de ses collectivités. La Société du Plan Nord, lancée en 2015, constitue l'instance clé du déploiement du Plan Nord. Il est souhaité que les résultats des travaux de recherche de l'OHMi Nunavik alimentent les stratégies d'avenir des communautés inuites.

## PARTENAIRES DE L'OHMI

Les projets de recherche de l'OHMi sont conduits en partenariat avec :

- l'Administration Régionale Kativik (ARK) et la société Makivik ; Ces organisations inuites coordonnent le développement économique et communautaire au Nunavik, l'aménagement d'infrastructures maritimes et de parcs, la gestion de la faune (caribou), etc. Elles travaillent dans une approche collaborative en guidant les chercheurs membres du Centre d'études nordiques, de l'Institut Nordique du Québec, de divers ministères et les chercheurs français de l'OHMi ;
- les villages nordiques : Kuujuaq, Kangiqsujuaq, Kangiqsulujuaq, Kuujuarapik, Umiujaq ;
- le parc national Tursujuq ;
- le conseil de bande de Whapmagoostui ;
- le Centre d'études nordiques ;
- les Universités Laval et du Québec à Montréal ;
- l'École de technologie supérieure et l'Institut national de la recherche scientifique du Canada.

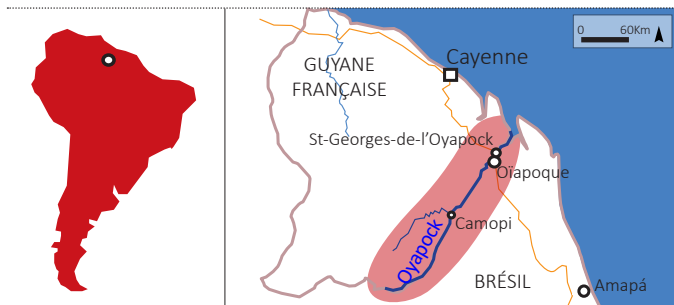
## CONTACTS

Armelle DECAULNE (Directrice) : [armelle.decaulne@univ-nantes.fr](mailto:armelle.decaulne@univ-nantes.fr)  
 Najat BHIRY (Co-directrice) : [najat.bhiry@cen.ulaval.ca](mailto:najat.bhiry@cen.ulaval.ca)  
 Fabienne JOLIET (Directrice adjointe) : [fabienne.joliet@agrocampus-ouest.fr](mailto:fabienne.joliet@agrocampus-ouest.fr)  
 Didier HAILLOT (Directeur adjoint) : [didier.haillot@etsmtl.ca](mailto:didier.haillot@etsmtl.ca)

## COORDONNÉES

Laboratoire UMR 6554 LETG  
 Campus du Tertre, BP 81227  
 44312 Nantes cedex 3  
<https://ohmi-nunavik.in2p3.fr/>





## CRÉATION

Juillet 2008

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE ( OU « FAIT STRUCTURANT » )

Socio-écosystème de forêt tropicale, organisé autour du fleuve Oyapock qui marque la frontière entre la France (Guyane) et le Brésil (État d'Amapá) et caractérisé par un isolement géographique.

## ÉVÈNEMENT FONDATEUR

Construction d'un pont sur l'Oyapock et ouverture de la zone aux influences extérieures.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Impacts socio-économiques
- Environnement, santé
- Biodiversité
- Modalités de l'anthropisation



## TERRITOIRE

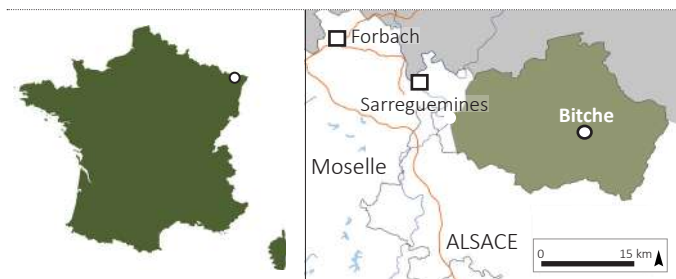
À la frontière entre la Guyane française et le Brésil, la zone observée s'étend sur les deux rives du fleuve Oyapock, frontière entre les deux pays. Entièrement situé en domaine forestier tropical, cet espace concerne les communes de Ouanary, Saint-Georges-de-l'Oyapock et Camopi, côté français, et la vaste commune d'Oiapoque, côté brésilien. Pour près de la moitié, cette zone est couverte par d'importantes aires protégées françaises et brésiliennes (Parc naturel régional de Guyane, Parc national amazonien de Guyane, Parque Nacional do Cabo Orange et Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque, terres indigènes au Brésil et zones de droit d'usage collectif côté français). Très peu peuplé, ce territoire est en cours de désenclavement avec l'ouverture récente de deux routes parvenant jusqu'au fleuve. La construction du pont fluvial transfrontalier accentue l'ampleur des changements.



## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Reliant par voie terrestre les communes de Saint-Georges-de-l'Oyapock et Oiapoque, le pont, finalisé en 2011 et inauguré six ans plus tard, constitue un événement modificateur d'importance pour la zone. L'apparition de cette infrastructure ne signifie pas nécessairement un rapprochement des populations voisines habituées à utiliser le fleuve pour échanger et se rencontrer, mais pourrait fort bien renforcer cet espace comme une zone de passage et de contrôle entre le Brésil et la Guyane, avec de nombreuses implications en termes de brassage de populations, de pression sur les terres et la forêt, d'impacts sur le fleuve, etc. L'objet de l'OHM est de suivre et de comprendre les paramètres qui vont ainsi influencer sur la population humaine et l'environnement, leurs interactions et leurs dynamiques.





## CRÉATION

Mars 2015

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Le retrait progressif de l'armée a pour effet de transformer le territoire en profondeur depuis une vingtaine d'années. On observe une tendance générale à la déprise à l'échelle du territoire - déprise industrielle, déprise ferroviaire, déprise agricole, déclin démographique, et plus généralement, déprise des services publics (maternité, service de chirurgie, écoles, bureaux de poste) - qui va s'accéléralant depuis la fin des années 1990.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

La profonde réforme de la Défense nationale en 1996 laisse entrevoir la perspective d'une dissolution (ou déplacement) de régiments, de camps et de bases militaires qui pourrait impacter fortement le territoire et les socio-écosystèmes du Pays de Bitche.

## THÉMATIQUES CLÉS

L'OHM souhaite favoriser les thématiques suivantes :

- Modes de vie en contexte de transformation
- Dynamiques de la biodiversité
- Aménités environnementale, sociales et culturelles
- Construction de l'expertise



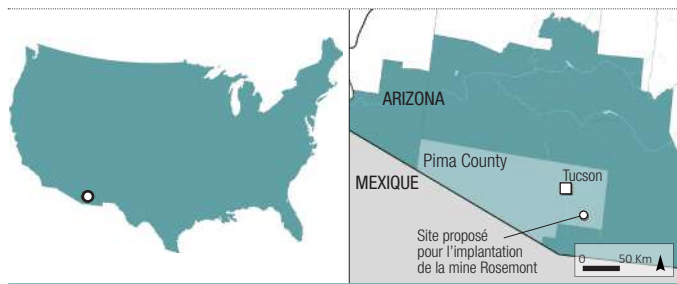
## TERRITOIRE

Situé au nord-est du département de la Moselle, le Pays de Bitche est un espace rural enclavé et frontalier bordé au nord par la frontière allemande (Rhénanie-Palatinat) et au sud par le département du Bas-Rhin. Sa partie occidentale se caractérise par un plateau découvert contrairement à sa partie orientale qui est essentiellement boisée. D'une surface de 615 km<sup>2</sup>, le territoire compte un peu moins de 35 000 habitants pour 46 communes. Le francique rhénan, langue régionale communément appelé platt, y est encore très usité. Depuis la seconde moitié du XV<sup>e</sup> siècle, le Pays de Bitche a été marqué par une forte tradition militaire.



## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

L'accéléralion du rythme des restructurations de la Défense sur fond de crise économique génère une forme d'incertitude quant à l'avenir du Pays de Bitche. Le territoire s'avère en effet structuré depuis plusieurs siècles par une présence militaire ayant fini par marquer de son empreinte le paysage, le tissu économique local, l'organisation des services publics, la distribution des espaces, les moyens de circulation et les écosystèmes... Il en résulte de profondes mutations sous l'effet d'une déprise généralisée (industrielle, ferroviaire, agricole...). Cette transformation doit d'autant plus être interrogée d'un point de vue historique que l'aménagement du territoire a toujours reposé sur l'exploitation et la maîtrise des ressources naturelles (par les industriels et les petits ouvriers-paysans) ainsi que sur le contrôle des espaces (par les militaires). L'OHM Pays de Bitche se fixe ainsi pour objectif d'examiner avec précision les dérèglements survenus ces dernières décennies, tout en mesurant les capacités et stratégies de résilience des humains et des écosystèmes à l'échelle de ce territoire.



## CRÉATION

1<sup>er</sup> janvier 2014

### CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Le territoire observé par l'OHM est marqué tant par l'exploitation minière, qui remonte à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, que par la croissance de la métropole de Tucson due non seulement au développement de l'industrie et des services mais aussi à la quête d'un climat chaud et sec de la part des retraités de l'Est des USA. Dans le contexte d'aridité qui caractérise le désert du Sonora, l'approvisionnement en eau de ce socio-écosystème représente un redoutable défi, d'autant que les usages deviennent aujourd'hui de plus en plus concurrents. Développement minier, agriculture et étalement urbain ont cependant coexisté durant près d'un siècle et demi. Ce n'est que récemment que la dynamique de gestion raisonnable de l'eau impulsée par les zones urbaines apparaît de plus en plus contradictoire avec les autres usages, notamment avec le développement d'un projet comme celui de la mine de Rosemont.

### ÉVÉNEMENT FONDATEUR

L'événement fondateur pour l'OHM est le début de la controverse autour de la mine de Rosemont, au sud de Tucson, dont l'ouverture est toujours incertaine du fait de nombreux recours juridiques. L'intensité des débats, dans un pays de tradition minière, montre les changements dans la relation Homme/milieu à l'échelle du Pima County, et notamment la montée en puissance de la valorisation des paysages et de la biodiversité par opposition à l'extraction des ressources naturelles comme le cuivre.

La question de la mine de Rosemont permet aussi d'interroger l'interaction entre différentes échelles d'organisation politique, de militantisme et de réglementation (local/régional/national), et de voir comment le doublon « gestion du paysage » / « gestion de la ressource hydrique » est la clé de voûte de l'ensemble du système local.



## THÉMATIQUES CLÉS

L'OHM souhaite favoriser les thématiques suivantes :

- la modélisation conceptuelle, portant sur les aspects hydrologiques du site minier de Rosemont et de l'ensemble du bassin de la rivière Santa Cruz ;
- la caractérisation des écosystèmes du bassin de la rivière Santa Cruz et de leur fonctionnement, abordés en termes de socio-écosystèmes complexes incluant de nombreux acteurs humains et non-humains ;
- le suivi des conséquences des opérations minières en termes de pollution, de changements écologiques ou de gestion hydrique, en s'intéressant particulièrement au courant du « new mining » (extraction minière responsable) et aux questions de responsabilité sociale et environnementale des entreprises ;
- l'étude de l'interface sciences/société, à travers le triptyque information/mobilisation/résistance ;
- la gestion des conflits environnementaux liés aux questions minières, notamment par la mise en perspective du territoire du Pima County avec d'autres régions du monde.

## TERRITOIRE

L'OHM Pima County se centre sur le territoire de la haute vallée de la rivière Santa Cruz, cours d'eau aujourd'hui éphémère qui traverse le Sud de l'Arizona. Il correspond au sud-est du « Sun corridor »



d'Arizona. En son sein se trouve la Région métropolitaine de Tucson, entourée de plusieurs montagnes culminant vers 2700/2900 mètres d'altitude. La tâche urbaine est très étendue aujourd'hui, couvrant cinq fois la surface de Paris pour une population d'environ 900 000 personnes. Comme dans l'ensemble de l'Ouest des USA, les zones urbaines se caractérisent par une très faible densité démographique. Le territoire observé comprend aussi 2 mines majeures à ciel ouvert en activité (Sierrita et Mission mine) et plusieurs mines abandonnées. Elle est enfin le siège d'activités agricoles comme l'élevage extensif en pâturages ouverts ou la culture irriguée (pécan, luzerne, etc.).

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Les problématiques socio-écologiques couvertes par l'OHM se déclinent en trois volets qui ont chacun une échelle temporelle et spatiale différente. Au niveau local et sur la période immédiatement contemporaine, l'OHM étudie la controverse autour du projet de Rosemont et la manière dont celui-ci polarise la population et les autorités dans le Pima County. A l'échelle régionale, et sur un pas de temps plus long, la question doit être replacée dans la problématique générale de la gestion des eaux de surface et des aquifères dans l'environnement aride du Sud-Ouest des États-Unis. Enfin, les problématiques abordées par l'OHM traitent de la question de l'utilisation / préservation des ressources naturelles et de la transformation/maintien des paysages, une thématique qui le place au centre d'une problématique globale et permet la comparaison avec d'autres observatoires et une analyse sur le temps historique long.

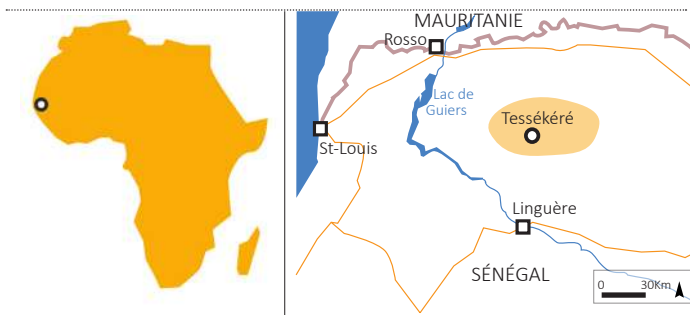
### CONTACTS

François-Michel LE TOURNEAU (Directeur)  
@ Francois-michel.le-tourneau@cnr.fr  
Larry Fisher (Co-Directeur)  
@ lafisher@arizona.edu

### COORDONNÉES

UMI 3157 iGLOBES - University of Arizona  
Marshall Building - 845N Park Avenue  
POBox 210158-B - Tucson, AZ 85721 - USA  
<https://ohmi-pima-county.in2p3.fr/>





## CRÉATION

Juin 2009

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

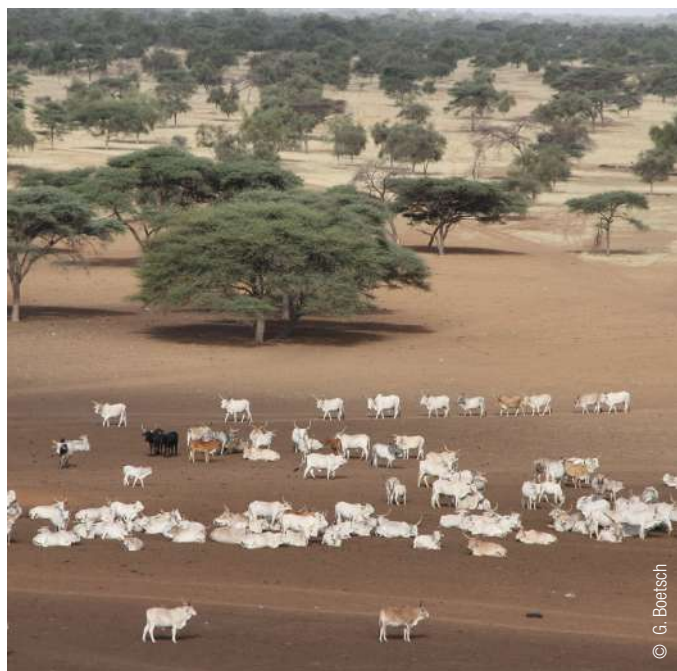
Quatre décennies de stress climatique et leurs impacts socio-économiques dans la zone sahélienne.

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Mise en place du projet Grande Muraille verte par l'Union africaine.

## THÉMATIQUES CLÉS

- Impacts directs et indirects de la Grande Muraille verte
- Dynamique des socio-écosystèmes
- Dynamique de la biodiversité
- Ingénierie écologique
- Santé et société



© G. Boetsch

## TERRITOIRE

Situé dans le Ferlo, région du nord du Sénégal, le territoire étudié par l'OHMi Tessékéré est caractéristique du Sahel africain. Cette vaste zone de transition bioclimatique, entre le domaine saharien au nord et les savanes soudanaises au sud, est caractéristique des crises écologiques et humaines consécutives aux épisodes de sécheresse qui touchent l'Afrique depuis plusieurs décennies. La région concernée par l'OHMi présente tous les traits propres au Sahel (déficit pluviométrique, pression anthropique sur le milieu, modification des grands équilibres écologiques) et la particularité d'être au cœur d'un très important programme panafricain de développement et de reforestation, appelé Grande Muraille verte.



© G. Boetsch



© A. Euzen

## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCOLOGIQUE

La mise en œuvre de l'initiative Grande Muraille verte, approuvée en janvier 2007 par l'Union africaine, représente une action combinée de lutte contre la sécheresse et de développement rural, sans précédent dans cette région. Les implications sanitaires, sociales et environnementales de ce programme sont porteuses de changements profonds, aussi bien au sein de la société que dans ses interactions avec le milieu. L'objet de l'OHMi est d'étudier, par l'approche intégrative des systèmes sociaux-écologiques sahéliens, les processus et les interactions à l'œuvre. Il s'agit en particulier d'observer et d'évaluer l'adaptabilité et la résilience du système selon quatre axes : "Eau, Sol, Air", "Biodiversité (faune et flore)", "Systèmes sociaux" et "Santé".

## CONTACTS

Gilles BOETSCH (Directeur)  
@ boetschgilles@gmail.com  
Aliou GUISSÉ (Co-directeur)  
@ aliou.guisse@ucad.edu.sn  
Priscilla DUBOZ (Dir. adjointe) : priscilla.duboz@gmail.com

## COORDONNÉES

UMI Environnement, Santé, Sociétés  
Université Cheikh Anta Diop (UCAD)  
Faculté de médecine  
BP 5005 Dakar-Fann - Senegal  
<https://ohmi-tessekere.in2p3.fr/>



## CRÉATION

Décembre 2010

## CADRE SOCIO-ÉCOLOGIQUE (OU « FAIT STRUCTURANT »)

Plus d'un siècle et demi d'aménagement du cours du Rhône (digues, épis, protections de berge, ouvrages hydro-électriques)

## ÉVÉNEMENT FONDATEUR

Crue de 2003 et signature du Plan Rhône en 2004 modifiant les logiques de gestion du fleuve

## THÉMATIQUES CLÉS

- Trajectoire géo-historique du fleuve et ruptures
- Applications territoriales du développement durable
- Fonctionnement du socio-écosystème fluvial
- Risques environnementaux (inondations, contaminants, ressource en eau)
- Restauration et renaturation des milieux aquatiques et riverains
- Expérimentation et application de nouveaux outils scientifiques



## TERRITOIRE

L'emprise géographique de l'OHM Vallée du Rhône correspond à l'axe fluvial du Léman à la Méditerranée, au fleuve lui-même, à ses milieux aquatiques annexes et aux zones riveraines, inondables pour certaines. Les territoires étudiés sont ainsi soumis à l'influence de nombreux aménagements présents sur tout le cours du fleuve. Ceux-ci résultent de deux périodes clés : la construction de la voie navigable (1840-1910) et la mise en place des équipements hydro-électriques (1948-1986). Ils ont conditionné l'évolution des paysages contemporains et la répartition des activités humaines. Un type particulier de paysage caractérisé par un Rhône « court-circuité », un canal et tous les ouvrages associés, se répète ainsi comme un motif territorial au niveau de chaque aménagement hydro-électrique permettant des comparaisons géographiques inédites et la mise en lumière des causalités de changement.



## PROBLÉMATIQUE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Espace économique et touristique, infrastructure de transport, outil de production d'énergie renouvelable, le fleuve est aussi un corridor de nature. L'exercice de différents usages, l'exploitation de ses ressources et plus largement la relation entre les hommes et ce milieu sont à l'origine de tensions entre acteurs et de choix en matière d'aménagement. Conséquence immédiate de la crue de 2003, l'État et les grands gestionnaires du fleuve ont signé en 2004 le Plan Rhône. Ce contrat de projet interrégional constitue un événement majeur : il s'agit désormais de concilier les différentes attentes, en essayant notamment de réussir un « développement durable ». L'OHM propose de suivre cette nouvelle période en produisant des connaissances pour alimenter le débat public. Il va ainsi s'intéresser aux flux d'eau, de sédiments et de polluants dans le corridor rhodanien et sur le littoral du delta, mettre en lumière l'effet des aménagements mais aussi celui des pratiques de gestion sur les formes fluviales et le cordon littoral, ainsi que leurs conséquences sociétales et environnementales. L'OHM analysera aussi les gains écologiques résultant des actions de restauration, l'évolution des représentations sociales et le jeu des acteurs.

## CONTACTS

Carole BARTHELEMY (Directrice) : @ carole.barthelemy@univ-amu.fr

Bertrand MORANDI (Animateur) : @ bertrand.morandi@graie.org

<https://ohm-vallee-du-rhone.in2p3.fr/>

## COORDONNÉES

UMR 5600 Environnement Ville Société

Site ENS de Lyon 1

5, parvis R. Descartes 6

9362 Lyon cedex 07

Prospectives  
**CNRS**  
**Écologie &  
Environnement**  
2023





---

**Direction de la publication**  
Stéphane Blanc et Agathe Euzen

**Direction éditoriale :**  
Stéphane Blanc,  
Agathe Euzen,  
Philippe Grandcolas

**Coordination**  
Adeline Guillet,  
Linda Salvaneschi,  
Floriane Vidal

**Conception graphique et maquette**  
Jean-Noël Dubois

**Membres CSI**  
**CNRS Écologie & Environnement**

Estelle Baehrel,  
Annie-France Bourmaud,  
Vincent Dubreuil,  
Patricia Gibert Brunet,  
Jean Nicolas Haas,  
Evelyne Heyer,  
Philippe Jarne,  
Didier Jouffre,  
Camille Larue,  
Arnaud Lenoble,  
Bruno Maureille,  
Laurent Memery,  
Frederic Mery,  
Cendrine Mony,  
Sylvain Pincebourde,  
Soizic Prado,  
Geneviève Prevost,  
Alain Queffelec,  
Virginie Rougeron,  
Sabine Sauvage,  
Marc-André Selosse,  
Margareta Tengberg,  
Myriam Valero

**Directeurs adjoints scientifiques**  
**CNRS Écologie & Environnement**

Françoise Gourmelon,  
Philippe Grandcolas,  
Dominique Joly,  
Agnès Mignot,  
Gilles Pinay

Impression : Sprint

ISSN :

Dépôt légal : novembre 2023

---

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...



**ÉCOLOGIE &  
ENVIRONNEMENT**

[ecologie-communication@cirs.fr](mailto:ecologie-communication@cirs.fr)  
CNRS - 3, rue Michel-Ange 75794 Paris Cedex 16