

Les
écosystèmes
en crise

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
- Heymans, A., Bredasell, 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 BBEES (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).

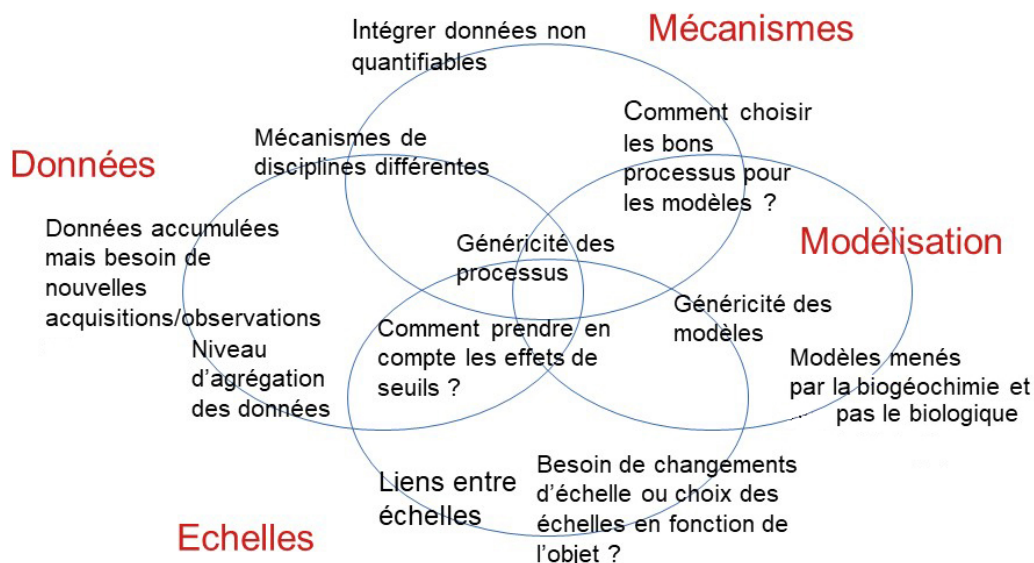
La prise en compte des interactions entre les différentes échelles

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 prémises 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-

pique 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.