

Les
grands
défis
environnementaux

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.

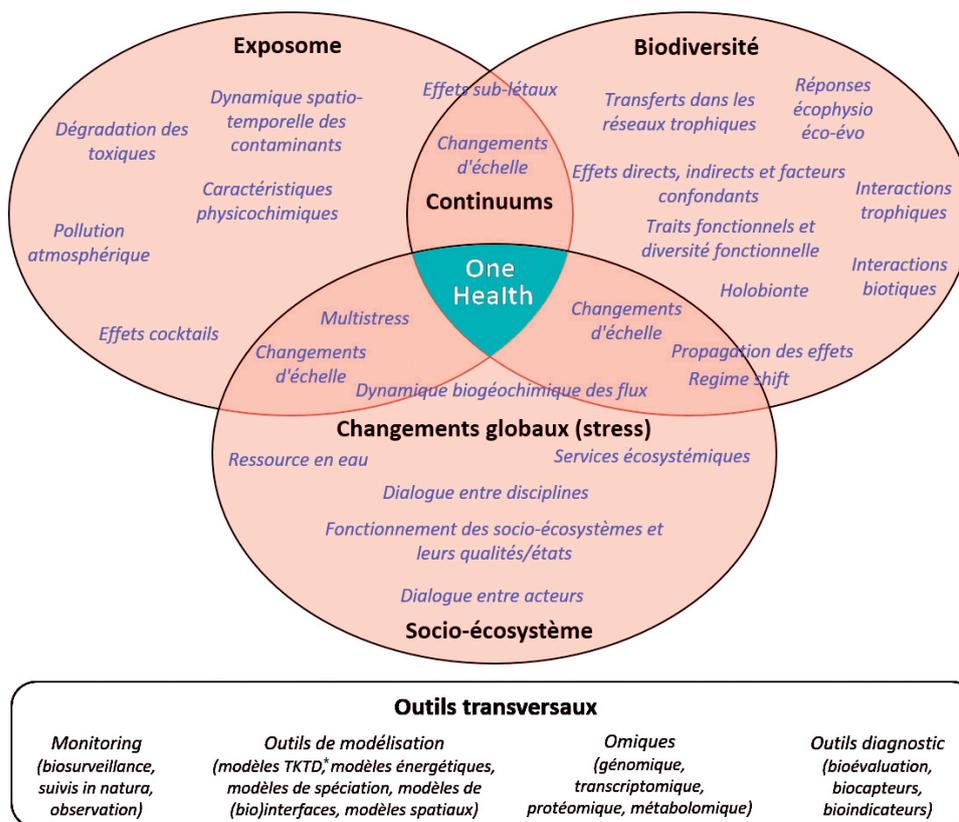


Figure 2. Thématiques abordées dans les contributions (en bleu) et groupement en thèmes fédérateurs et outils transversaux (en noir, entourés par groupe).

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 écophysiological 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 stressseurs 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 JEVI*...

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 (Atlas, 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 pro-caryotes), 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.
- Atlán, 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

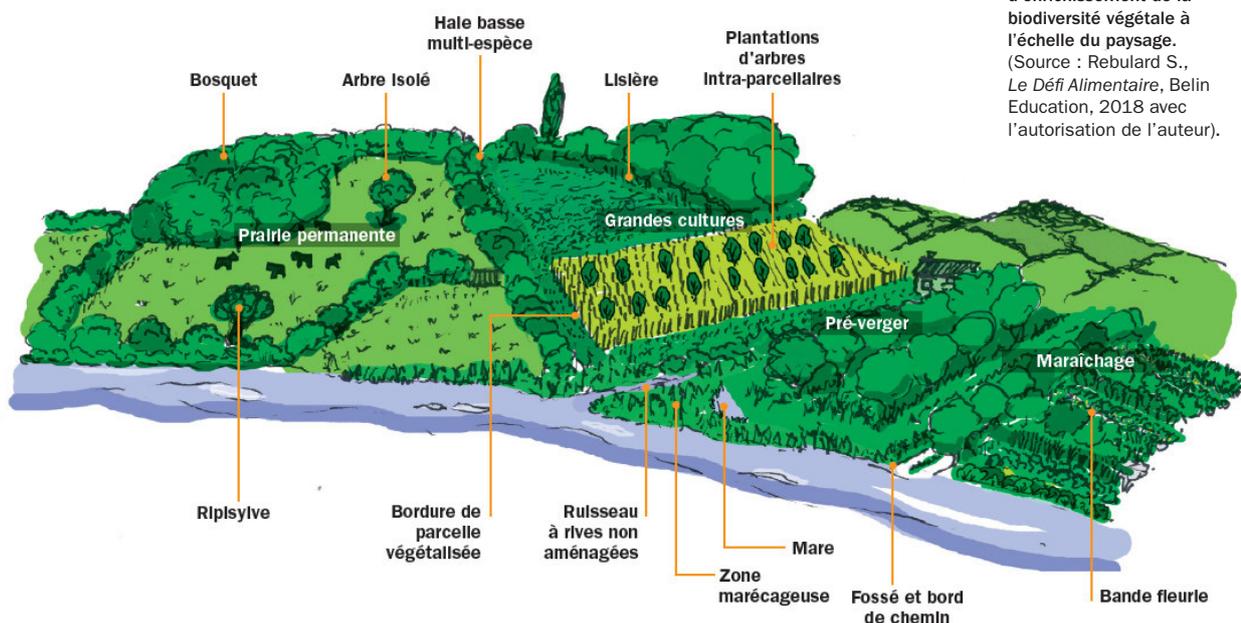


Figure 1.
Diversité des éléments semi-naturels d'enrichissement de la biodiversité végétale à l'échelle du paysage. (Source : Rebulard S., *Le Défi Alimentaire*, Belin Education, 2018 avec l'autorisation de l'auteur).

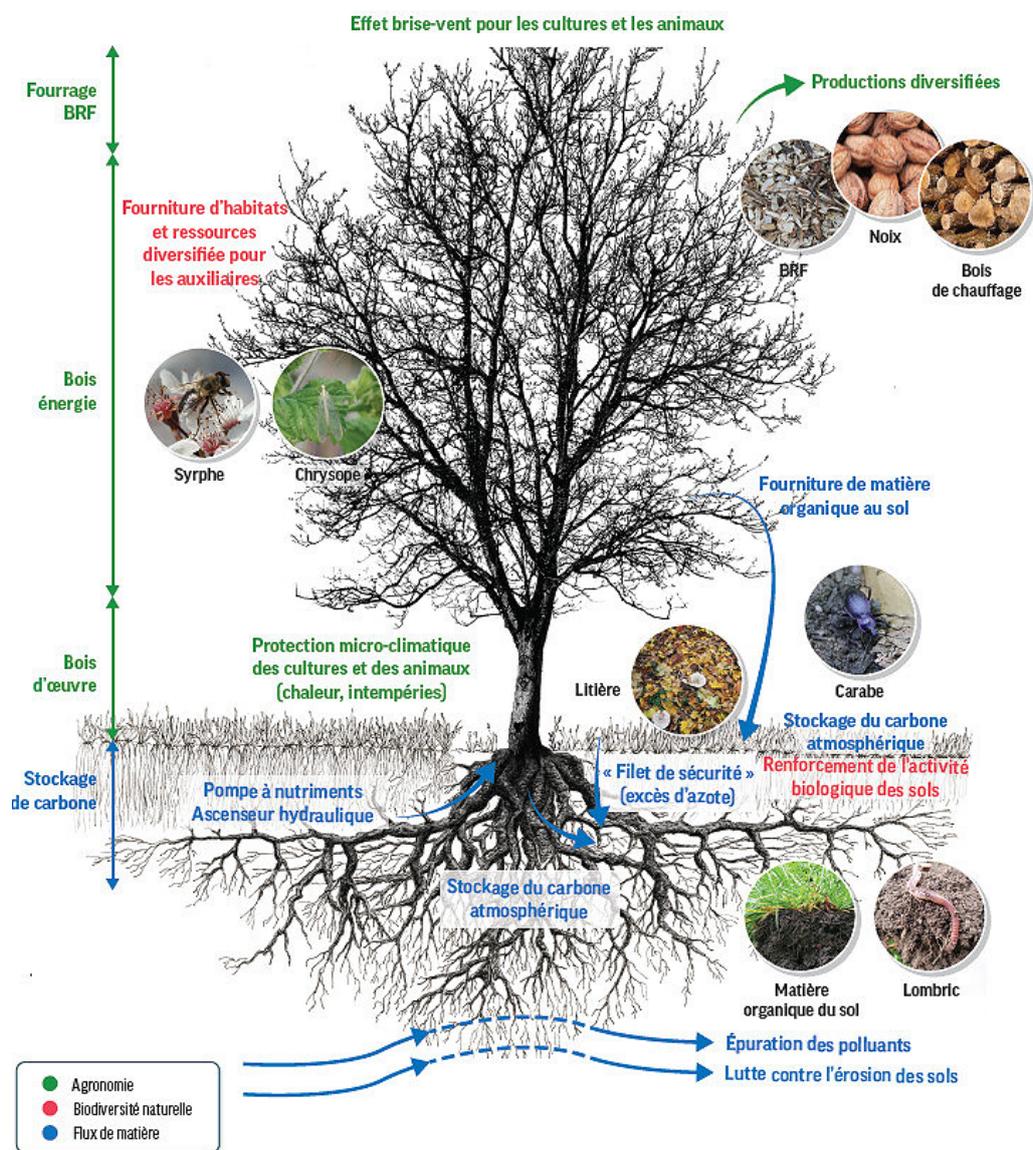


Figure 2. Fonctions des arbres associés à d'autres productions agricoles. (Source : Rebulard S., *Le Défi Alimentaire*, Belin Education, 2018 avec l'autorisation de l'auteur).

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.

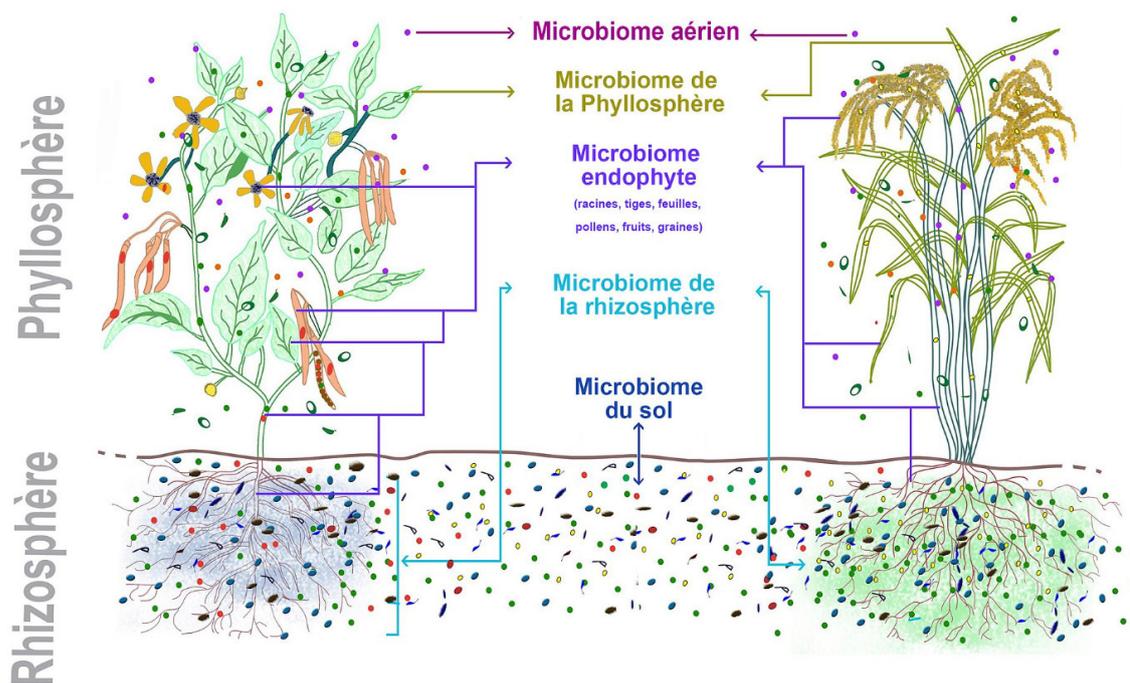
Microbiote

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 Vendenbergh *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).

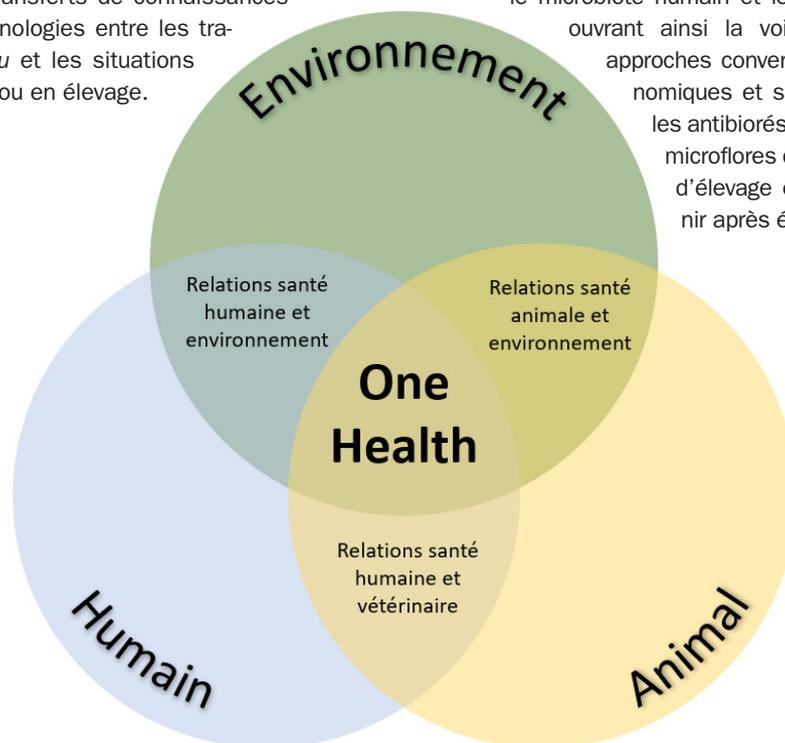
Ces questions peuvent être transposées dans les élevages, par exemple chez les insectes, pour comprendre la dynamique de développement de leur microbiote pendant les différentes phases de développement (et les conséquences zootechniques et physiologiques, notamment immunitaires).

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).

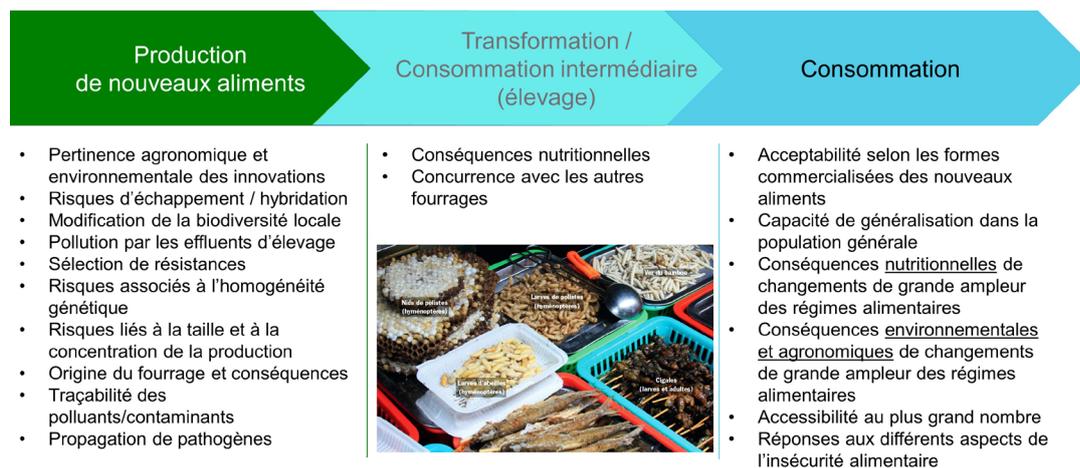


Figure 6. Vue générale des questions de recherche abordées, organisées par grandes étapes du système alimentaire. (Figure réalisée par les animateurs de l'atelier)

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 I, 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 Vandenberghe, 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).

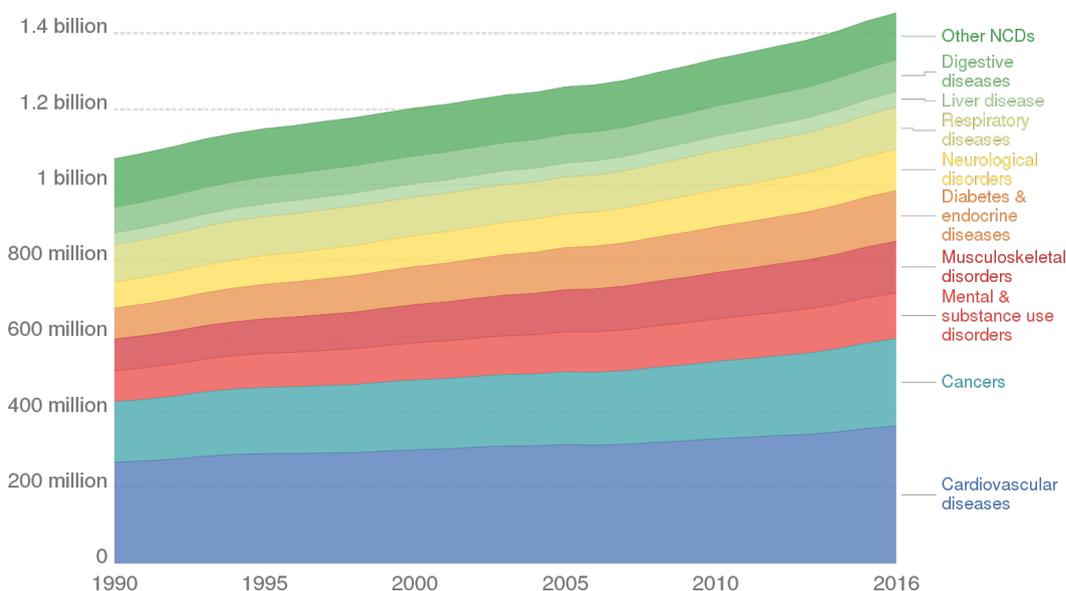
Que savons-nous des liens entre socio-écosystèmes et maladies non infectieuses ? Comment les appréhendons-nous dans nos champs respectifs ? Ces questions sont abordées à travers trois grandes approches. Certains chercheurs travaillent préférentiellement sur les détermi-

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

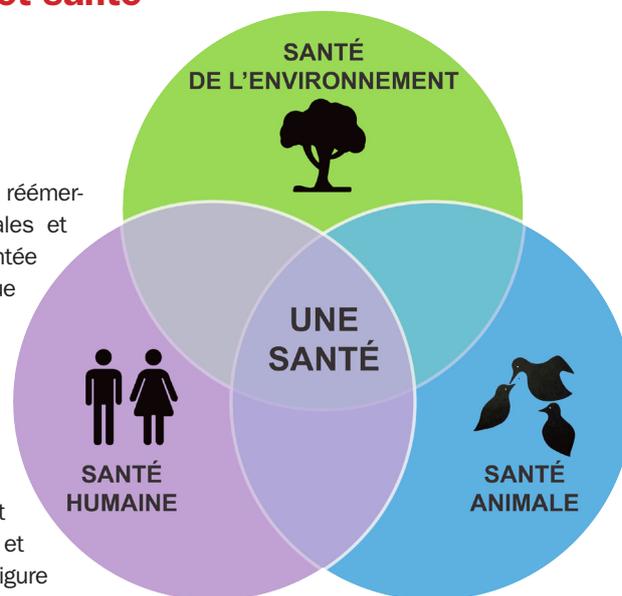


Figure 3.
La Triade One Health.
© Wikimedia Commons

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).

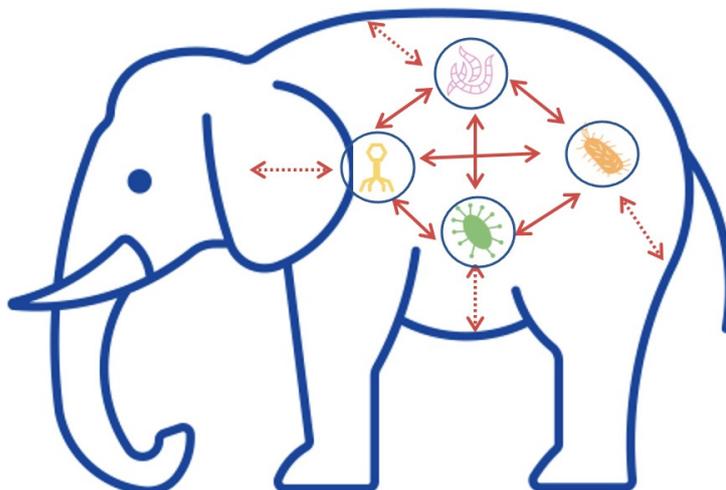


Figure 4.
L'hôte fonctionne comme un écosystème dans lequel plusieurs symbiotes pathogènes, commensaux, et mutualistes interagissent entre eux.
© A Rivero

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 intégralité).

- 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 aviaires (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).

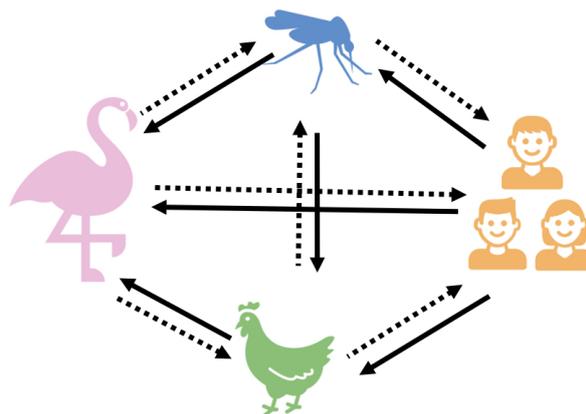


Figure 5.
Une zoonose est une maladie ou une infection naturellement transmissible de l'animal à l'homme.
© A Rivero

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'ilots 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.

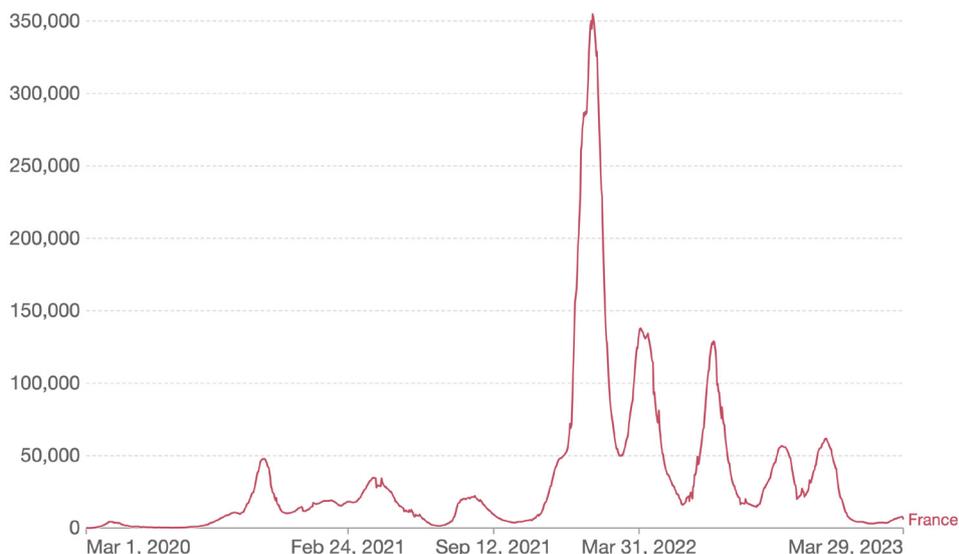


Figure 6.
Cas de COVID
en France
depuis Mars
2020.
© Our world
in data

Source: WHO COVID-19 Dashboard

CC BY

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.

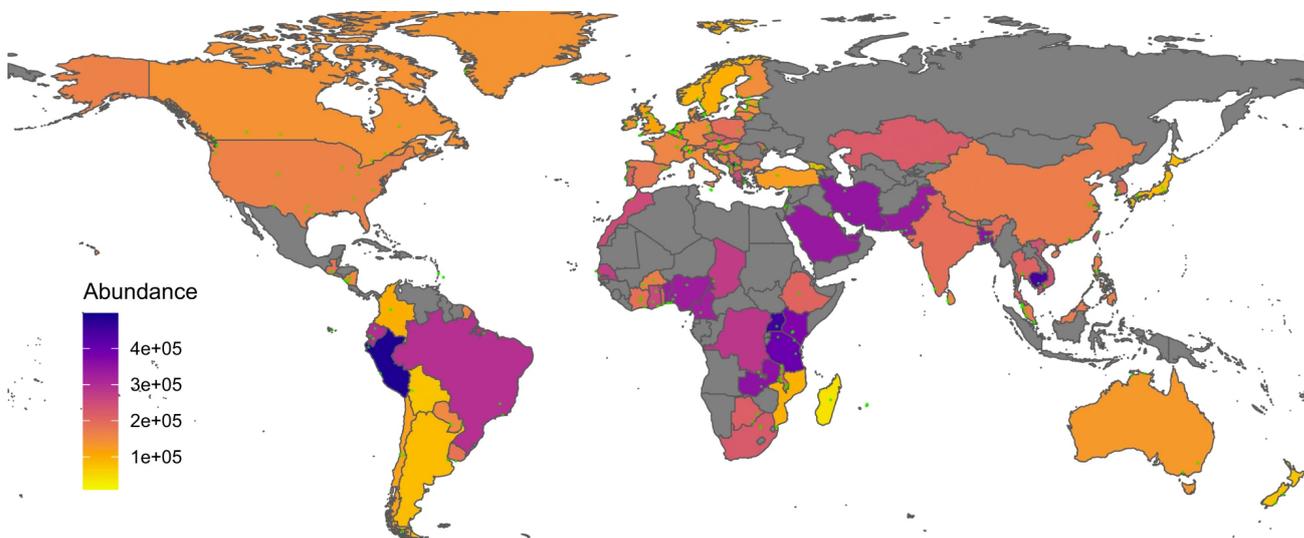
- Les masses d'eau telles que les effluents d'eaux usées, les lacs et les rivières sont des milieux favorables à l'évolution et la propagation de nouvelles résistances (Figure 7). Plusieurs projets pilotes ont déjà été mis en place pour surveiller l'antibiorésistance dans les eaux usées, mais des connaissances 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.