



Prospective scientifique
pour la recherche française
sur la biodiversité - 2023

Démarche

La recherche française contribue très significativement à l'avancée des connaissances dans le domaine de la biodiversité. Dans le cadre de sa participation à AllEnvi (Alliance nationale de recherche pour l'environnement) et de l'animation du Groupe « grand enjeu transversal » (GET) biodiversité, la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) a piloté une prospective sur les recherches à mener dans ce domaine. Au-delà de la résonance qu'il trouvera auprès d'un public académique, ce texte s'adresse aux acteurs publics et privés en mesure d'appuyer la programmation et le financement de la recherche sur la biodiversité.

Connaissances, méthodes et demandes sociales évoluant tant au niveau national qu'international, une actualisation des projections et perspectives de recherche s'avérait nécessaire. Le paysage de la connaissance et de la recherche a en effet fortement changé ces dernières années avec la publication des grandes évaluations mondiales de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (Ipbes), la pérennisation du Partenariat européen cofinancé sur la biodiversité, Biodiversa+, ou encore le développement du Groupe d'observation de la Terre, Geo. À cela s'ajoute le besoin de plus en plus affirmé par les citoyens, les acteurs privés, de mieux protéger la biodiversité sous toutes ses facettes.

Ce travail a été conduit en relation avec les travaux et propositions de l'Ipbes (Giec de la biodiversité), de la Convention sur la diversité biologique (*Convention on Biological Diversity*, CBD) et de Biodiversa+. Il tient compte des prospectives des membres fondateurs de la FRB, des lois et mesures nationales ainsi que d'autres prospectives dans le domaine de l'environnement. En 2021, le Conseil scientifique (CS) de la FRB, cœur du Groupe enjeu transversal (GET) Biodiversité d'AllEnvi, y a travaillé en collaboration avec un large panel d'experts.

Sommaire

Démarche	2
Comité de rédaction de la Prospective scientifique 2023	3
Introduction	6
Axe 1. Explorer et documenter la biodiversité, ses états et fonctionnements, en relation avec ses environnements	8
1.1 Inventaires de la biodiversité, distribution biogéographique et paysagère, métriques	9
1.2 Étude des processus écologiques et évolutifs	10
1.3 Relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes	13
Axe 2. Études des interactions entre biodiversité et changements globaux	14
2.1 Documenter les effets des pressions anthropiques directes, leurs synergies et antagonismes	15
2.2 Systèmes de production alimentaires et énergétiques : des pressions majeures et en conflit	17
2.3 Décrypter les interactions biodiversité-(éco)santé, animale, végétale, fongique, microbiologique : l'approche « One-health » en lien avec l'humain	18
Axe 3. Protéger et restaurer la biodiversité dans tous les écosystèmes	20
3.1 Protéger la biodiversité dans tous les territoires	21
3.2 Évaluer et améliorer les modalités de protection et de restauration de la biodiversité	24
3.3 « Approches basées sur les écosystèmes » : répondre à plusieurs enjeux environnementaux et aux besoins humains	25
Axe 4. Les réponses systémiques : changement transformateur et mesures leviers	26
4.1 Diversité des valeurs associées aux relations entre humains et non-humains	27
4.2 Modes de gouvernance, stratégies d'acteurs, conflits d'usages	28
4.3 Construire des transitions : notions de « nexus », de « changements transformateurs » et de « mesures levier »	29
4.4 Contribution nationale à la protection de la biodiversité mondiale, limites planétaires	30
4.5 Ressources génétiques, nouvelles technologies et accès et partage des avantages : vers de nouvelles déclinaisons	31
Axe 5. Infrastructures de recherche nécessaires aux sciences de la biodiversité	32
5.1 Observation de la biodiversité : collecte, organisation et mise à disposition des données et des ressources	33
5.2 Synthèses des données et analyses pluridisciplinaires	35
5.3 Développer des modèles et scénarios dédiés au pilotage des transitions	36
5.4 Sciences participatives, sciences citoyennes : des complémentarités à développer	36
Un regard de parties prenantes	38
1. Les besoins futurs en matière de recherche sur la biodiversité	38
2. Les principaux facteurs à prendre en compte dans le futur de la recherche sur la biodiversité	39
Conclusion	42
Annexe 1 : Glossaire	44
Annexe 2 : Références bibliographiques des focus	46

Comité de rédaction de la Prospective scientifique 2023

La rédaction et l'édition de ce document de Prospective scientifique ont été coordonnées par Denis, président de la FRB, Aurélie, responsable du pôle Science et communautés de recherche de la FRB, Joseph, chargé de mission scientifique au sein du pôle Science et communautés de recherche de la FRB, et Hélène, directrice de la FRB.

Cette Prospective a été préparée et discutée collectivement par les membres des Conseils scientifiques de la FRB de 2021 à 2023, les experts du Groupe enjeu transversal (GET) Biodiversité d'AllEnvi, et des collaborateurs externes de la communauté de recherche française. La composition était la suivante, par ordre alphabétique :

Nom	Prénom	Affiliation
ABBADIE	Luc	SORBONNE UNIVERSITÉ
ALBERT	Cécile	CNRS-INEE
ARGILLIER	Christine	INRAE
BARNAUD	Adeline	IRD
BAROT	Sébastien	IRD
BARTHÉLÉMY	Daniel	CIRAD
BAZILE	Didier	CIRAD
BESNARD	Aurélien	CNRS-CEFE / EPHE
BILLET	Philippe	UNIVERSITÉ JEAN MOULIN LYON 3
BOISVERT	Valérie	UNIVERSITÉ DE LAUSANNE
BONZOM	Jean-Marc	IRSN
BOUDET	Céline	INERIS
CLAUDET	Joachim	CNRS
COURCHAMP	Franck	UNIVERSITÉ PARIS SUD

Nom	Prénom	Affiliation
CRASQUIN	Sylvie	CNRS
DEUFFIC	Philippe	INRAE
DUPOUEY	Jean-Luc	INRAE
GABA	Sabrina	INRAE
GARRIDO	Francis	BRGM
GIRON	David	UNIVERSITÉ DE TOURS
GOULLETQUER	Philippe	IFREMER
GRANDCOLAS	Philippe	MNHN
GRENOUILLET	Gaël	UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
HEDDE	Mickaël	INRAE
HELLAL	Jennifer	BRGM
JACTEL	Hervé	INRAE
KEFI	Sonia	UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
KERGOAT	Gaël	INRAE
KLEIN	Étienne	INRAE
LE GALL	Line	MNHN
LE BOULANGER	Christophe	IRD
MARON	Pierre-Alain	INRAE
MAZÉ	Camille	CNRS
MORIN	Xavier	CEFE-CNRS
PETIT-MICHAUT	Sandrine	INRAE
PEYRARD	Nathalie	INRAE
PLANTEGENEST	Manuel	AGRO CAMPUS OUEST
ROCHE	Benjamin	IRD
RONCE	Ophélie	CNRS
ROUSSET	François	UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
SAINTENY	Guillaume	AGROPARIS TECH
SARRAZIN	François	SORBONNE UNIVERSITÉ
SCEMAMA	Pierre	IFREMER
TIXIER-BOICHARD	Michèle	INRAE
WINCKER	Patrick	CEA
YOUNG	Juliette	INRAE
ZEPELLI	Daniella	IFREMER

Introduction

L'étude de la diversification des êtres vivants, de leur adaptation à des environnements variés et des patrons de distribution de cette biodiversité au cours de l'histoire de la Terre et dans l'espace est un champ disciplinaire de recherche ancien et très actif, notamment au niveau national. Il est structuré par des concepts forts, issus de champs théoriques très solides en écologie et biologie évolutive. Ces champs de recherches sont en plein essor grâce au développement des sciences participatives, à la transdisciplinarité, aux révolutions technologiques (génomique, intelligence artificielle, etc.) et à l'accès à d'énormes bases de données spatialisées. De même, l'étude des relations entre les différentes sociétés humaines et les non-humains est issue d'une longue tradition dans les différentes disciplines des sciences humaines et sociales et fait l'objet de questions émergentes dans ces champs disciplinaires.

Les études et sciences de la biodiversité se sont développées en agrégeant ces disciplines variées et en capitalisant sur leurs forces et leurs traditions. Complémentaires, elles ont tenté de comprendre les changements rapides causés par les pressions anthropiques, leurs effets sur le vivant et ses environnements, sur les sociétés qui en dépendent, les réponses de ces dernières. Le point de vue adopté dans cette prospective est d'explorer les avancées et perspectives de ce champ de recherche à la lumière des trois objectifs de la Convention sur la diversité biologique (*Convention on Biological Diversity, CBD*).

Ces objectifs offrent un cadre structurant pour analyser les défis auxquels les sociétés doivent répondre aujourd'hui pour résoudre la crise de la biodiversité, et que la recherche doit accompagner : conservation et restauration de la diversité biologique ; utilisation durable de ses éléments ; et accès et partage des avantages issus de l'utilisation des ressources génétiques. Ces trois objectifs et leur combinaison difficile, mais nécessaire, concernent la recherche la plus fondamentale comme la plus impliquée, de l'écologie aux sciences de l'évolution en passant par l'économie, la sociologie et l'anthropologie. Ils impliquent d'aborder de concert la biodiversité et les sociétés, d'envisager leurs relations en termes de systèmes dynamiques, d'interconnexions, de rétroactions et d'évolution. Cela requiert des efforts à la fois disciplinaires et transdisciplinaires, dans la logique des *sciences de la durabilité**.

Cinq thèmes de travail structurants

La prospective avance cinq axes articulés les uns aux autres :



L'axe 1 propose de décrire et d'explorer la biodiversité, ses états, son fonctionnement en relation avec l'environnement ;



L'axe 2 porte sur les interactions entre la biodiversité et les changements globaux ;



L'axe 3 concerne la protection et la restauration de la biodiversité dans tous les écosystèmes ;



L'axe 4 s'intéresse aux réponses systémiques pour enrayer l'érosion de la biodiversité : changements transformateurs et mesures leviers ;



L'axe 5 identifie les infrastructures de recherches nécessaires aux sciences de la biodiversité.

Axe 1.

Explorer et documenter la biodiversité, ses états et fonctionnements, en relation avec ses environnements



① L'axe en un coup d'œil...

Cet axe identifie cinq directions majeures :

1. Identifier un socle minimal de variables d'observation et d'indicateurs ;
2. Documenter la distribution de la diversité biologique, à toutes les échelles de temps et d'espaces, les mécanismes impliqués aux différents niveaux d'organisation ;
3. Connaître les réseaux d'interaction et les flux de matière au sein des écosystèmes, les mécanismes écologiques associés ;
4. Étudier les processus évolutifs, les capacités et limites en termes de réponses et adaptations aux modifications environnementales actuelles ;
5. Explorer ces relations à des échelles larges (incluant les réseaux d'interactions, l'originalité fonctionnelle, les synergies, *trade-off*, etc.).

Les connaissances sur la biodiversité se déclinent à travers de multiples facettes toutes autant fondamentales : les composantes de la biodiversité (structure, composition, évolution, etc.), ses niveaux d'organisation (des gènes aux écosystèmes : voir Focus 1), les interactions et dynamiques en jeu.

1.1 Inventaires de la biodiversité, distribution biogéographique et paysagère, métriques

Lorsqu'il s'agit de mesurer la biodiversité, un enjeu majeur est de s'accorder sur un socle commun de variables d'observation et d'indicateurs avec des métriques associées (voir Focus 1). La gamme des variables disponibles et pertinentes s'améliore avec le développement de méthodes d'observation (ADN environnemental, observation humaine *in situ*, capteurs à haute fréquence, télédétection, science participative, etc.). Le choix des variables est susceptible de changer en fonction du développement des concepts caractérisant la biodiversité dans ses différentes composantes et niveaux d'organisation (espèce, écosystème, etc.).

Alors que près de 80 % des espèces ne sont pas encore décrites, avec de fortes disparités selon les taxons,

les inventaires de la biodiversité continuent d'être essentiels. Ces inventaires combinent des collections concernant directement les spécimens ou leurs « traces » par des images, des sons, des carottes sédimentaires, de l'ADN, des herbiers, des séquences moléculaires, des compositions chimiques, etc. La progression des techniques, notamment les approches de taxonomie intégrative ou l'accès facilité à des données d'ADN environnemental et à l'intelligence artificielle, va permettre d'accélérer la caractérisation de la diversité des procaryotes et des eucaryotes, son organisation et ses fonctions. Celles-ci restent en effet toujours très mal connues (on estime par exemple que des millions d'espèces d'insectes restent à découvrir), voire ignorées des recherches (voir Focus 2 et Point 5.1.). Ces biais taxonomiques doivent être pris en compte à la fois dans les futures recherches et dans les politiques publiques.

FOCUS 1

Les variables essentielles de biodiversité : un cadre balayant les différents niveaux d'organisation de la biodiversité (Essential Biodiversity Variables, EBVs)

Initiative mondiale, le Réseau d'observation de la biodiversité (Bon - "Biodiversity Observation Network") du Groupe d'observation de la Terre (Geo - "Group on Earth Observation"), a fait émerger en 2013 le concept de « variables essentielles de biodiversité » définies comme des « mesures nécessaires pour étudier, rapporter et gérer les changements de la biodiversité, en se concentrant sur l'état et la tendance des éléments de la biodiversité » (Pereira *et al.*, 2013). Le Geo Bon a proposé une liste de six classes de variables couvrant différents niveaux d'organisation du vivant. Plusieurs variables sont proposées au sein de chaque classe :

- **composition génétique** (exemples de variables essentielles : diversité allélique, différenciation génétique des populations) ;
- **populations d'espèces** (exemples de variables essentielles : abondance des populations, structures des populations) ;
- **traits de vie des espèces** (exemples de variables essentielles : événements phénologiques, caractéristiques de comportement migratoire) ;
- **composition des communautés** (exemples de variables essentielles : diversité taxonomique, interactions spécifiques) ;
- **fonctions des écosystèmes** (exemples de variables essentielles : productivité primaire nette, régime de perturbations) ;
- **structure des écosystèmes** (exemples de variables essentielles : structure des habitats, étendue et fragmentation des habitats).

La documentation de ces variables permet de représenter la biodiversité, construire des indicateurs, facilitant ainsi la « traduction » des données scientifiques sur la biodiversité en informations de contenu plus social et politique. Initialement, une vingtaine de variables a été proposée et le cadre décliné pour le climat et l'océan. Ces variables documentaient alors l'évolution de paramètres clés du système climatique (précipitations, température, composition de l'atmosphère, etc.) et du système océanique (carbone organique dissous, abondance et distribution de poissons, étendue des mangroves et composition, etc.). De nombreux choix pour les variables et leurs métriques correspondantes restent à faire.

1.2. Étude des processus écologiques et évolutifs

Les processus écologiques et évolutifs, imbriqués, font l'objet de deux grands types d'approches complémentaires, convergeant dans l'étude des relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes.

Réseaux d'interaction et flux de matière au sein des écosystèmes

Les processus écologiques et évolutifs régissent l'organisation des (méta)populations, (méta)communautés, (méta)écosystèmes – « naturels » et « anthropisés » – ; les (méta)réseaux d'interactions écologiques (relations mutualistes, de prédation ou de compétition, etc.) ; les interactions entre ces différents niveaux d'organisation et entre « variables essentielles de biodiversité » (voir Focus 1 sur les EBV). Ces processus varient selon la structure des (méta) paysages, de l'environnement physico-chimique et

rétroagissent avec le fonctionnement des écosystèmes et les fonctions écologiques. La compréhension de ces interactions doit permettre d'anticiper les effets des variations de biodiversité.

La connaissance de ces réseaux permet de caractériser les flux de circulation du carbone et des éléments nutritifs, sur terre, dans les sols et les océans. Techniquement, les avancées récentes en *barcoding*, *metabarcoding*, eDNA, etc. aident à la caractérisation de ces réseaux d'interaction. Il s'agit d'avoir une vision représentative de l'ensemble de ces interactions et rétroactions, des mécanismes sous-jacents, en mettant en relation des bases de données de différentes natures (voir Axe 5 sur les infrastructures dédiées) et de nouveaux travaux de modélisation pour mieux parvenir à décrire et comprendre les rétroactions. Une telle vision doit permettre de mieux **caractériser les synergies et compromis (trade-offs) entre les fonctions écologiques soutenues par la biodiversité.**

FOCUS 2

L'organisation des micro-organismes et leurs rôles au sein des écosystèmes : de leur importance pour les sciences de l'eau, du sol, du climat, de la biodiversité et de la santé

De par leur grande biomasse, leur diversité phylogénétique et leurs fonctions écologiques diverses, les micro-organismes jouent des rôles importants dans les domaines des sciences de l'eau, du sol, du climat, de la biodiversité et de la santé. Leur diversité et leur organisation écologique au sein d'êtres vivants « hôtes » (microbiotes), des sols et sous-sols, des aquifères et des milieux extrêmes, terrestres, dulçaquicoles et marins, restent encore mal connues. Alors que cette diversité est quasi exclusivement caractérisée au moyen de proxys (ARNr 16S) dont on connaît les limites, il importe de repenser les efforts de recherches *via*, par exemple, le séquençage de génomes complets.

Si l'on prend l'exemple des micro-organismes marins, leurs interactions sont à la base des réseaux trophiques. Caractériser leur diversité et quantifier leur sensibilité aux changements de l'océan (réchauffement, stratification renforcée des eaux de surface, acidification, élévation de l'horizon de saturation des carbonates, désoxygénation, pollution)

sont des enjeux importants pour les sciences du climat. De façon similaire, la diversité microbienne des sols, dont les champignons, importe dans le maintien de la fertilité des sols, dans la nutrition et le développement des plantes : sa connaissance est un enjeu important pour les sciences agronomiques et forestières. Enfin, la diversité microbienne des microbiotes (intestinal, de la peau, des racines, etc.) est à mettre en relation avec la physiologie et la santé des macro-organismes. Il est donc essentiel de comprendre leurs modes de structuration en (méta)communautés, en relation avec les macro-organismes, leurs réponses aux changements globaux et leurs rôles dans le fonctionnement des écosystèmes - en particulier leurs implications majeures dans les grands cycles biogéochimiques (carbone, azote, soufre, etc.) et dans le devenir de certains contaminants.

Processus évolutifs, réponses et adaptations

La compréhension des interactions entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes comprend à la fois l'étude des impacts des changements environnementaux sur l'évolution darwinienne et étude des effets des processus évolutifs sur le fonctionnement des écosystèmes sur l'environnement, physico-chimique et social des êtres vivants. La compréhension de ces rétroactions doit aider à définir les conditions sous lesquelles les réponses de la biodiversité aux changements globaux sont susceptibles d'amplifier ou de ralentir ces changements (voir Axe 2).

Affectant traits fonctionnels et traits d'histoire de vie, de la micro- à la macro-évolution, et s'appuyant notamment sur des données de séquençage complet de génomes sur des pas de temps variables, l'étude des processus évolutifs darwiniens aide à comprendre et à évaluer les processus de réponses génétiques et phénotypiques des populations et des communautés en relation avec les modifications environnementales actuelles. L'évolution des capacités d'adaptation des

espèces (survie et fécondité, capacités de dispersion, thermo-tolérance, spectre alimentaire, etc.) selon la structure des écosystèmes et la qualité des habitats est ainsi un mécanisme essentiel de maintien des espèces dans des paysages fragmentés et hétérogènes.

Les approches éco-évolutives combinent maintenant l'étude de l'évolution des organismes et de leurs capacités d'adaptation et l'étude des processus écologiques, des variations des modes d'organisation et de régulation des populations, des communautés et des écosystèmes. Elles réunissent une diversité d'approches : génétique des communautés, des paysages, etc. **La compréhension des rétroactions entre ces dynamiques évolutives et écologiques exige l'analyse de l'organisation et de la dynamique des réseaux d'interactions**, à différentes échelles spatiales et temporelles (voir Point 1.1.). Ces dynamiques rétroagissent et peuvent conduire à des basculements d'écosystèmes (voir Focus 3), en relation avec les réseaux d'interaction des humains (voir Axe 2). Le sujet de l'impact des multiples changements globaux sur la biodiversité et les rétroactions, à travers ces mécanismes éco-évolutifs, est traité dans l'axe 2.

FOCUS 3

Détecter les signaux précoces de changement des écosystèmes

Comprendre les modalités de réponse des écosystèmes aux changements climatiques et anthropiques en cours et à venir est une étape clé de la mise en place de stratégies de gestion. Intuitivement, nous nous attendons souvent à ce que la réponse d'un système soit proportionnelle à la perturbation. Cependant, de nombreux systèmes complexes ne se comportent pas comme attendu. Certains écosystèmes peuvent présenter des réponses non-linéaires, notamment plus importantes qu'attendues sur la base du changement à l'origine de la réponse. Des écosystèmes peuvent même basculer de leur état actuel vers un état différent (avec une composition en espèces et un fonctionnement différents) une fois une valeur seuil de changement atteinte appelée « point de bascule » (ou « *tipping point* »). Ces réponses sont donc inattendues, avec des conséquences écologiques et économiques importantes et souvent irréversibles, du moins sans intervention extérieure (Petraitis, 2013). On parle alors de « transition catastrophique » en référence à la théorie mathématique des catastrophes qui décrit ce type de comportements (Thom, 1972). Un exemple classique de transition catastrophique dans un écosystème est l'eutrophisation des lacs peu profonds, qui peuvent soudainement passer d'un état riche en espèces et où l'eau est transparente à un état turbide plus pauvre en espèces suite à la pollution de l'eau. D'autres exemples de transitions catastrophiques sont la désertification des écosystèmes arides, la dégradation des récifs coralliens ou la transition entre savane et forêt (Newton, 2021).

Comprendre les déterminants de la réponse des écosystèmes aux différentes perturbations qu'ils subissent ainsi qu'identifier des indicateurs de réponses abruptes ont été l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche récents en écologie scientifique (Scheffer, 2009).

Un résultat théorique a été particulièrement utile en ce sens : **tout système dynamique qui approche un point au niveau duquel il va changer de stabilité (c'est-à-dire un point de bifurcation, par exemple une transition catastrophique) subit un « ralentissement critique » (Gilmore, 1981)**. Ce phénomène, bien connu en physique, signifie que le système devient plus lent à récupérer suite à une perturbation à mesure qu'il s'approche d'une transition.

Ce ralentissement, détectable sur des données temporelles du système, a conduit à la proposition de divers indicateurs visant à quantifier le ralentissement critique d'écosystèmes et donc leur perte de stabilité (Scheffer, 2009). Dans les écosystèmes présentant une structure spatiale marquée, ou auto-organisée, comme les écosystèmes arides par exemple, d'autres indicateurs basés sur cette structure spatiale ont été proposés (Kéfi *et al.*, 2014).

La disponibilité croissante de données d'écosystèmes, dans le temps et dans l'espace, en particulier grâce aux données satellites, ouvre la porte à tester et utiliser cette myriade d'indicateurs proposés par la littérature théorique. Une perspective typiquement prometteuse est celle de pouvoir cartographier la résilience des écosystèmes pour identifier des zones dans lesquelles les écosystèmes sont actuellement en train de perdre (ou de gagner) en résilience. Pour l'instant, ces indicateurs ont été validés théoriquement, en laboratoire et en systèmes contrôlés, mais leur fiabilité dans des systèmes *in situ* reste à être explorée. En particulier, une compréhension plus fine des mécanismes sous-jacents est importante pour interpréter les tendances observées comme pour mettre en place des stratégies de protection des écosystèmes.

1.3 Relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes

Les relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (*Biodiversity-Ecosystem Functioning, BEF*) sont au cœur des préoccupations de protection de la biodiversité, à différentes échelles temporelles et spatiales. Examinées expérimentalement le plus souvent aux échelles spatiales et temporelles fines, elles demandent à être mieux explorées à des échelles plus larges, contextualisées selon l'histoire locale et régionale de la biodiversité. Le focus 4 explore le cas des forêts. Les autres écosystèmes (steppiques, aquatiques, agricoles et urbains, etc.) sont tout autant concernés par cette problématique.

L'objectif général est ainsi de mieux comprendre les relations entre la diversité biologique et ses modes de fonctionnement. Cela demande des connaissances

sur l'architecture des réseaux écologiques et le fonctionnement des communautés biotiques et des écosystèmes, les flux de matières et d'énergie dans ces réseaux d'interactions (voir Point 1.1.), les processus évolutifs qui les régissent (voir Point 1.2.). La notion d'originalité fonctionnelle permet d'aborder le rôle écologique essentiel de certaines espèces dans leurs écosystèmes. Un thème associé est celui des espèces rares, peu abondantes, endémiques, ou avec des rôles écologiques originaux, qui peuvent contribuer fortement au fonctionnement des écosystèmes (cas des espèces clés de voûte). Ces espèces aux fonctions uniques, irremplaçables, exigent la compréhension de leurs caractéristiques écologiques, la cartographie de leur distribution et l'évaluation de leur vulnérabilité aux menaces actuelles et futures.

FOCUS 4

Les relations entre biodiversité et fonctionnement dans les écosystèmes forestiers : consensus et incertitudes

Les forêts ont une place privilégiée dans les écosystèmes dits naturels. Riches en espèces, elles couvrent par exemple plus du tiers de la surface de la France, de l'Europe et du monde (IGN 2021, FAO et Unep, 2020). Au-delà de la production de produits ligneux et non-ligneux, d'être des lieux incontournables de cadre de vie et de loisirs, et de revêtir parfois une importante valeur culturelle ou spirituelle (FAO et Unep, 2020), elles assurent un nombre sans égal de services écosystémiques fondamentaux pour les humains et les non-humains. Ce sont des puits de carbone (Pan *et al.*, 2011) qui jouent un rôle central dans la régulation du climat (Chapin *et al.*, 2008), la protection des sols, contre des risques naturels (avalanches, inondations), la filtration de l'eau et de l'air, etc.

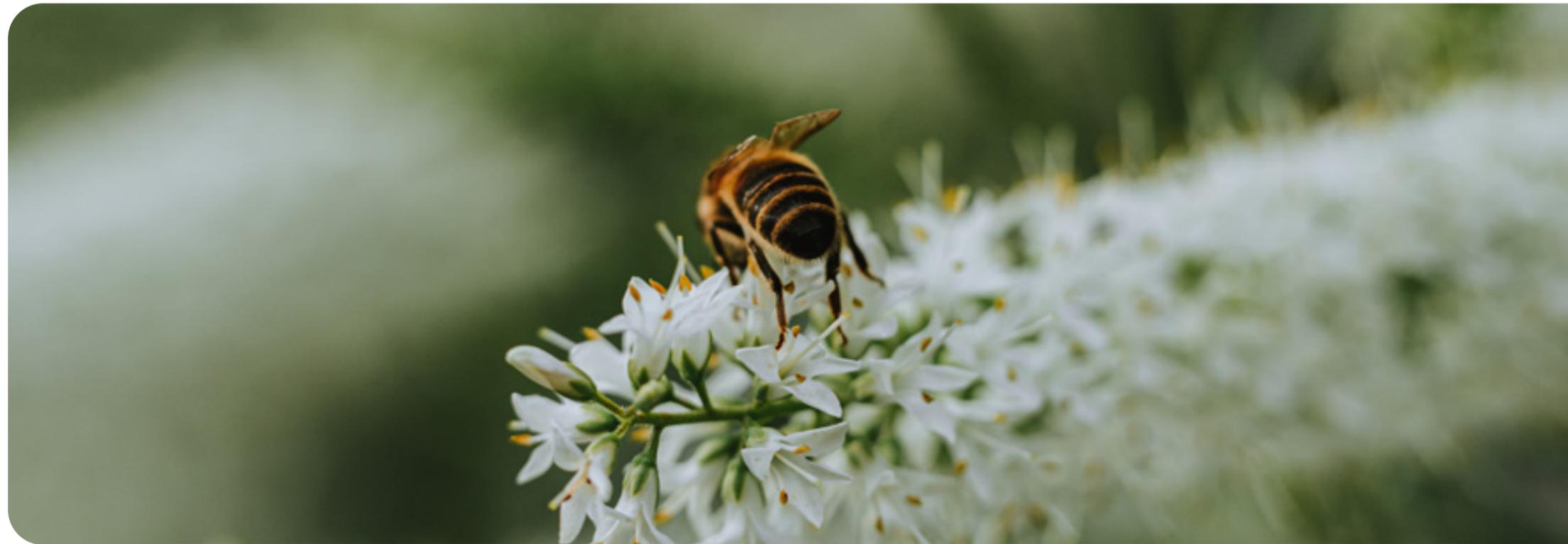
L'étude de l'importance de la diversité en essences forestières, dont le rôle sur la diversité pour d'autres groupes taxonomiques semblait déjà prégnant (Li *et al.*, 2022), a pris une nouvelle ampleur au cours des deux dernières décennies. Ce tournant a été marqué par la mise en évidence formelle de ses effets sur de nombreux services écosystémiques cités précédemment : productivité des écosystèmes (Morin *et al.*, 2011, Toigo *et al.*, 2015, Liang *et al.*, 2016), résistance aux tempêtes et aux attaques

de ravageurs (Jactel *et al.*, 2021) tamponnage des conditions microclimatiques (Zhang *et al.*, 2022), ou encore résistance et résilience aux sécheresses des peuplements forestiers (del Río *et al.*, 2017, Jourdan *et al.* 2020), et donc meilleure adaptation aux conditions futures induites par le changement climatique, du moins en région tempérée. Il faut cependant noter que cela reste très dépendant du contexte environnemental local et de l'identité des espèces (Grossiord *et al.*, 2014).

Alors que les écosystèmes forestiers sont fortement touchés par les impacts du changement climatique, et que les politiques publiques accroissent les pressions sur les écosystèmes forestiers (transition énergétique et bois-énergie, recherche de maximisation du rôle de puits de carbone forestier), le besoin de recherches sur les questions BEF est donc crucial afin de mieux comprendre le fonctionnement des forêts et d'anticiper leur réponse aux changements en cours ainsi que les enjeux associés. **Les travaux futurs devraient particulièrement se focaliser sur les mécanismes en jeu, afin de mieux mettre en évidence les possibles synergies ou conflits liant diversité et multifonctionnalité des écosystèmes forestiers.**

Axe 2.

Étudier les interactions entre biodiversité et changements globaux



② L'axe en un coup d'œil...

Cet axe identifie neuf directions majeures :

1. Documenter les pressions directes et questionner les synergies, antagonismes et effets cumulés à différentes échelles spatio-temporelles ;
2. Décrire et relier les conséquences biologiques des pressions et leurs effets pour les sociétés ;
3. Prendre en compte des boucles de rétroactions entre biodiversité, activités anthropiques et climat ;
4. Identifier les facteurs sociétaux sous-jacents (« drivers indirects ») des pressions anthropiques ;
5. Développer des approches qui reposent sur les concepts de multifonctionnalité ;
6. Évaluer la durabilité des pratiques (espèces domestiquées / sauvages) dans une approche systémique intégrant d'autres enjeux ;
7. Développer les connaissances sur les fonctions régulatrices de la biodiversité associées à la santé ;
8. Améliorer les approches préventives, diminuer les risques sanitaires (incl. scénario)

Les pressions anthropiques sont à la fois directes et indirectes. Elles ont de nombreux impacts sur la biodiversité, synergiques et antagonistes. Il s'agit de caractériser et hiérarchiser ces effets et leurs rétroactions, notamment à travers les systèmes de production et de la santé, les relations entre santé des individus et des écosystèmes.

2.1. Documenter les effets des pressions anthropiques directes, leurs synergies et antagonismes

On distingue cinq grands facteurs de pression directe, à savoir : changement d'usage des sols, changement climatique, invasions biologiques, pollutions et surexploitation des ressources. Ces pressions directes affectent la biodiversité sous toutes ses formes, des gènes aux écosystèmes, mais également les fonctions écosystémiques qui y sont associées ainsi que les biens et services que les humains en retirent. Il est

donc nécessaire de documenter leurs effets à plusieurs niveaux et à travers plusieurs prismes, tels que : le déclin ou la disparition de populations, d'espèces et d'écosystèmes, les extinctions en chaînes ; les adaptations des espèces et les transformations des écosystèmes ; les pertes de fonctions écologiques dont certaines sont essentielles aux humains (régulation du climat, fertilité de sols, pollinisation, etc.) ; l'homogénéisation biotique – spécifique, génétique ou fonctionnelle – et l'uniformisation des paysages (et effets associés sur le fonctionnement des écosystèmes) ; etc.

FOCUS 5

Les pollutions

La pollution de l'environnement a pris de l'importance avec l'industrialisation au début du XIX^e siècle. Elle prend des formes diverses, physiques (bruit et lumière par exemple) et chimiques (apports nutritifs, pesticides, hydrocarbures, métaux lourds, produits pharmaceutiques par exemple), ou combine les deux (plastiques). L'accumulation des preuves de contamination de l'environnement par ces « entités nouvelles » à l'échelle planétaire suggère que l'humanité a dépassé la limite que la Terre pouvait supporter dans ce domaine (Persson *et al.*, 2022).

Certains polluants sont nouveaux, que ce soit par leur usage récent (nanoparticules) ou la prise de conscience tardive de leur impact (plastiques), et une grande partie d'entre eux sont soumis à des réglementations d'usage et des limites de contamination environnementales. C'est le cas par exemple des produits phytopharmaceutiques, dont l'encadrement réglementaire des usages n'a cependant pas contribué à diminuer les effets sur la biodiversité. En France, l'utilisation des pesticides principalement agricoles joue un rôle significatif dans la réduction de la biodiversité des vertébrés terrestres et aquatiques (oiseaux, amphibiens, poissons). En ce qui concerne les effets sublétaux, particulièrement dans le cas de mélanges complexes de contaminants, les connaissances restent encore trop rares pour permettre une évaluation robuste du risque (Leenhardt *et al.*, 2022).

Le cas de l'avifaune est un bon exemple de la multiplicité des mécanismes d'atteinte à la biodiversité par l'exposition aux produits phytopharmaceutiques. Les oiseaux granivores sont directement exposés lors de l'ingestion de nourriture contaminée, alors que les populations d'insectivores souffrent d'une diminution de l'abondance de leurs proies, ces dernières étant plus sensibles aux molécules en cause.

Une expertise collective (Leenhardt, Mamy, Pesce, Sanchez *et al.*, 2022) a également souligné le déficit actuel de connaissances sur les impacts de ces contaminations sur la biodiversité marine en général, et sur les écosystèmes ultramarins terrestres et côtiers en particulier. Développer ces connaissances constituera un élément crucial pour l'élaboration d'outils réglementaires spécifiques aux écosystèmes d'Outre-Mer ou au milieu marin. La puissance des moyens actuels de description de la biodiversité et de ses fonctions aux différentes échelles d'organisation et la possibilité de modéliser l'évolution des écosystèmes en fonction des scénarios d'évolution des pressions futures, renforcées par une amélioration des méthodes analytiques mesurant l'imprégnation environnementale, devraient permettre de soutenir des programmes de recherche ambitieux intégrant la complexité des interactions entre les pollutions et les organismes. Les réseaux de recherche nationaux (comme Ecotox hébergé par Inrae) et internationaux, s'appuyant sur la mutualisation de sites d'étude instrumentés à long terme (comme Long Term Ecological Network) ainsi que certaines Zones ateliers seraient alors en mesure de combler les lacunes des connaissances actuelles de façon pluridisciplinaire, depuis le fonctionnement du vivant jusqu'aux enjeux économiques, sociaux et juridiques posés par l'accroissement des pressions de pollution.

Étant donnée la diversité des facteurs directs de pression sur le monde vivant, la question des synergies et antagonismes, des effets cumulés, entre ces facteurs est essentielle (voir Focus 5 pour le cas des pollutions). Par exemple, c'est l'accumulation des changements d'usage des sols à diverses échelles spatiales (parcelle, paysage, etc.) cumulés dans l'espace et le temps qui détermine le devenir des espèces, leur distribution spatiale, à travers la disparition des habitats, leur fragmentation, la perte de continuités écologiques. De plus, il importe de comprendre les interdépendances à échelle large (par exemple entre terre-mer-atmosphère),

le rôle des interfaces écosystémiques comme les littoraux, intervenant dans la régulation du climat, les transferts d'eau et de matières (dont les polluants), les cycles biogéochimiques, déterminant à échelle large la dynamique des espèces et des écosystèmes.

Au-delà de l'analyse des effets des pressions directes, la compréhension des effets des changements globaux exige de faire le lien entre les conséquences biologiques de ces pressions et les effets qui en découlent pour les sociétés.

Ces répercussions incluent, entre autres, les effets sur les services de régulation (comme la dégradation du contrôle biologique de la qualité des eaux et de l'air, la modification des dynamiques des ressources en eau, l'émergence et la diffusion de pathogènes), les conséquences sociales (comme la pauvreté, la sécurité alimentaire) et géopolitiques (comme les risques de conflit et de migration). Ces effets doivent être décrits, compris, hiérarchisés et projetés dans des scénarios en fonction de trajectoires possibles ou souhaitées à des niveaux territoriaux variés. Un des objectifs de ces scénarios est de permettre aux acteurs et décideurs de s'en saisir pour définir leurs nouvelles stratégies et les changements de pratiques à mettre en place. Toutefois, **il est aujourd'hui critique que ces démarches prospectives (scénarios, visions et récits de futurs souhaités ou possibles) soient co-construites et qu'elles puissent aider concrètement à la prise de décision, tout en permettant aux territoires de passer à l'action.**

L'étude des boucles de rétroactions entre biodiversité, activités anthropiques - notamment à travers leurs conséquences sociales - et climat est un sujet majeur. La notion de *limites planétaires**, caractérisant des points de bascule à l'échelle planétaire, déclinable à échelle locale, permet de connecter le déclin de la biodiversité aux autres enjeux environnementaux, la dynamique de la biodiversité affectant également le franchissement ou l'approche des autres limites.

2.2. Systèmes de production alimentaires et énergétiques : des pressions majeures pesant sur la biodiversité

Les systèmes de production alimentaires (agriculture et aquaculture, pêche, chasse et cueillette) ont des impacts majeurs sur la biodiversité, alors même que celle-ci est un déterminant majeur de la qualité et de la durabilité de ces systèmes, à travers les fonctions de régulation des écosystèmes.

Il est notamment fondamental de concevoir des modes de gestion durables, basés sur les principes de l'agroécologie : rôle prépondérant de la diversité biologique, multifonctionnalité des paysages agricoles, durabilité et multi-performance des systèmes agricoles. Il s'agit ainsi de valoriser les fonctions des écosystèmes afin d'assurer la production alimentaire, de restaurer la biodiversité, d'atténuer les effets du dérèglement climatique et de garantir des revenus aux agriculteurs. Ces pratiques peuvent et doivent également être repensées et intégrées dans un schéma d'économie circulaire, par exemple en recréant des liens entre éleveurs et céréaliers autour des enjeux de fertilisation. Les recherches doivent tenir compte des conditions locales et doivent impliquer les acteurs pour identifier et comprendre des preuves de concept ponctuelles, favoriser l'adoption des systèmes innovants (voir Focus 6).

Le changement de paradigme qu'implique l'agroécologie concerne aussi l'aquaculture et les pêcheries mais également, de manière plus générale, la durabilité, le devenir des pratiques de chasse et de cueillette, et tous les modèles basés sur l'exploitation des populations animales et végétales. À l'échelle des territoires, la conception de nouveaux modes de gestion doit tenir compte des synergies ou antagonismes entre les solutions envisagées, et notamment mieux intégrer les potentiels conflits entre acteurs tels que l'usage des terres entre production agricole vivrière et bio-carburants, ou l'utilisation de pesticides entre les agriculteurs, apiculteurs ou riverains. De ce fait, les approches doivent être systémiques afin de tenir compte des impacts des modes de production sur la biodiversité, des besoins pour la production (eau, énergie, infrastructures, main d'œuvre) et leur production de déchets, de polluants ou de chaleur (voir Axe 4).



FOCUS 6

Caractériser les effets des systèmes de production : exemple de la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre (sud des Deux-Sèvres)

Comment transformer des territoires agricoles pour les rendre résilients et sains (sensu une seule santé) pour les humains, les non-humains et l'environnement ? Comment engager les habitants, les acteurs (dont les agriculteurs) et les décisionnaires dans le processus de transformation ? Comment évaluer les effets des actions transformatrices ?

C'est l'ensemble de ces questions qui constitue le programme de recherche mené sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre, un territoire de 450 km² situé au sud du département des Deux-Sèvres (Nouvelle-Aquitaine), infrastructure de recherche labellisée par le CNRS. Les recherches qui y sont menées depuis près de 30 ans sont interdisciplinaires, transdisciplinaires (impliquant les parties prenantes) et basées sur une approche systémique, expérimentale et multi-échelles. Elles visent à quantifier le rôle de la biodiversité dans la production agricole et le revenu des agriculteurs, ainsi qu'à mettre en place des stratégies basées sur les principes de l'agroécologie. Des expérimentations menées dans des centaines de parcelles de colza et de tournesol ont ainsi montré le rôle majeur des insectes pollinisateurs dans la production de ces cultures. Ainsi, la pollinisation entomophile permet d'augmenter les rendements jusqu'à 30 %, augmentation qui se traduit par une augmentation de la marge brute des agriculteurs d'en moyenne 110 €/ha en colza. **La comparaison de la performance de cette solution fondée sur la nature avec l'utilisation d'intrants (pesticides, azote) montre que les deux stratégies permettent d'augmenter les rendements, mais que seule la pollinisation par les insectes permet une augmentation significative des revenus.** Ce résultat s'explique en grande partie par le coût plus faible de la pollinisation (même en tenant compte de coût de location de ruches) par rapport à l'utilisation d'intrants.

Les chercheurs ont également testé la faisabilité du plan Ecophyto (réduction massive d'usage des pesticides). Des expérimentations ont été mises en place avec et par les agriculteurs dans leur parcelle de céréales d'hiver. Dans une partie de la parcelle, les agriculteurs ont réduit l'usage de fertilisant et l'intensité de désherbage (application d'herbicides ou nombre de travail du sol). L'ensemble des autres modes de gestion est resté identique. La comparaison des rendements entre les zones avec et sans réduction n'a pas mis en évidence de réduction significative de rendement, ce qui s'est traduit mécaniquement par une augmentation de la marge brute des agriculteurs.

Depuis plus de 10 ans, près de 150 agriculteurs ont participé à ces expérimentations. Malgré ces résultats, peu de changement dans les pratiques ont été observés. Au-delà de la recherche des raisons de cette continuité, les chercheurs explorent désormais également des modes de reconnexion des consommateurs et des producteurs afin que la transformation vers l'agroécologie ne soit pas portée par les seuls producteurs. Plusieurs actions sont menées auprès des habitants de ce territoire pour relocaliser le système agri-alimentaire et pour quantifier avec eux les liens d'interdépendance entre leur comportement alimentaire, leur santé, celle de la biodiversité qui les entoure et de l'environnement. Au-delà de l'acquisition de connaissances, ces actions visent à enclencher des changements transformatifs chez les habitants pour rendre leur territoire résilient et sain.

2.3. Interactions biodiversité animale, végétale, fongique, microbiologique - (éco)santé : l'approche « One Health » en lien avec l'humain

La notion de santé est associée à des interactions complexes entre les humains et la biodiversité - animale, végétale, fongique et microbienne - qui dépendent des changements globaux et du contexte d'augmentation des populations humaines. En effet, ce contexte est directement lié à une réduction

drastique des milieux peu anthropisés (notamment déforestation), à une urbanisation croissante associée à un développement des infrastructures de transport et à des variations concomitantes de la diversité biologique tant sauvage que cultivée ou élevée (Par exemple l'homogénéisation génétique des espèces domestiquées) avec, paradoxalement, une promiscuité parfois facilitée entre humains, pathogènes et vecteurs.

Les études doivent porter sur les liens entre ces pressions, les variations de biodiversité associées (réduction des tailles de population, fragmentation des paysages et réduction des flux de gènes, perte de diversité génétique) et l'émergence de pathologies (zoonoses, épizooties, maladies végétales émergentes, etc.). Les connaissances à développer concernent en particulier les fonctions régulatrices de la biodiversité associées à la santé, y compris mentale ; le contrôle biologique des pathogènes et de leurs vecteurs dans le cas des maladies à transmission vectorielle ; la prévention des maladies infectieuses et les effets de dilution assurés par la diversité biologique.

Ces connaissances doivent permettre d'améliorer les approches préventives, de diminuer les risques sanitaires tout en protégeant la biodiversité. Une telle approche préventive exige de construire des scénarios anticipant les risques de maladies émergentes (nouvel agent pathogène) ou ré-émergentes (réinstallation d'un ancien pathogène dans une zone où il avait disparu), mais aussi explorant les conséquences d'établissement de vecteurs de pathogènes et d'espèces envahissantes (comme les champignons responsables de la chalarose du frêne ou de la chytridiomycose), tout en aidant à lutter contre les espèces qui sont déjà établies et/ou qui sont indigènes, de développer des systèmes d'alerte précoce (voir Focus 7), ceci dans le cadre d'une conception intégrative des écosystèmes.

FOCUS 7

Les interactions biodiversité-(éco)santé : l'approche « One Health » en lien avec l'humain

Depuis le début des années 1970, on décompte de plus en plus d'épidémies à travers le monde. La connectivité mondiale croissante est telle que les épidémies, initialement confinées à des zones tropicales, se sont de plus en plus transformées en pandémies touchant l'humanité entière, comme l'a démontré la pandémie de Covid19. Dans ce contexte, il est important de noter que les activités humaines détériorant la biodiversité sont pointées comme l'une des principales causes d'émergence d'épidémies. En effet, 75 % des maladies émergentes sont des zoonoses, c'est-à-dire des agents infectieux passant de l'animal à l'humain et vice versa.

Pour expliquer ce phénomène, la théorie de l'effet de dilution a été particulièrement mise en avant ces dernières années. Au sein d'un écosystème avec une forte biodiversité, de nombreuses espèces animales seront faiblement compétentes à un pathogène donné, ce qui aura tendance à « diluer » sa transmission. En cas de perte de biodiversité, ces espèces faiblement compétentes sont amenées à disparaître, ce qui annule cet effet de dilution et permet aux microbes de se transmettre de façon plus intense. De plus, les activités humaines liées à la perte de biodiversité, en particulier la déforestation, entraînent *de facto* une pénétration plus importante des populations humaines au sein des écosystèmes. En conséquence, le contact entre espèces sauvages et populations humaines sera plus fort, augmentant la probabilité d'un saut d'espèces de ces microbes. Enfin, la faune domestique peut également servir de « pont » entre la faune sauvage et les populations humaines car la faible diversité des individus au sein des élevages va avoir pour conséquence d'amplifier la transmission d'agents infectieux dangereux. Dans ce contexte, les travailleurs au sein de ces élevages peuvent devenir un premier passage vers l'émergence de zoonoses au sein des populations humaines.

C'est dans ce contexte qu'une approche "One Health" est particulièrement plébiscitée aujourd'hui. Proposant de lier santé humaine, santé animale et santé environnementale, cette approche intégrative a pour vocation de mieux appréhender la surveillance et la prévention de l'émergence de ces zoonoses. La pandémie de Covid19 a montré l'urgence de recherche et d'actions opérationnelles sur cette thématique. Initiée il y a maintenant 20 ans à l'échelle internationale, l'initiative Prezode compte, en novembre 2022, 16 gouvernements et 180 institutions. Cette initiative a pour objectifs de renforcer les réseaux de surveillance épidémiologique à l'interface animal/humain dans le monde entier et de concevoir et implémenter des stratégies de protection de la biodiversité permettant de réduire le risque d'émergence de zoonoses. Pour atteindre ces objectifs, cette initiative se base sur la production de connaissances scientifiques, en particulier sur la relation biodiversité/maladies infectieuses tout en adoptant une approche de co-construction avec tous les acteurs des différents secteurs afin de les impliquer très tôt dans le processus et ainsi de faciliter l'implémentation de ces stratégies de prévention.

Axe 3.

Protéger et restaurer la biodiversité dans tous les écosystèmes



③ L'axe 3 en un coup d'œil...

Cet axe identifie neuf directions majeures :

1. Identifier et comparer le rôle et l'efficacité de différents types d'aires protégées (AP) mais aussi de celles d'autres mesures de conservation, en lien avec leurs dimensions socio-économiques et éthiques ;
2. Améliorer la répartition spatiale des zones à différents statuts de protection ou objectifs de conservation de la biodiversité ;
3. Comprendre les capacités de dispersion et de déplacement des individus/populations hors des aires protégées jusqu'à l'échelle des paysages et identifier les conditions facilitantes/barrières ;
4. Développer les critères d'un véritable « filet de sécurité mondial » ;
5. Explorer les méthodes dites *autres mesures de conservation efficaces par zone** ;
6. Étudier la portée écologique et sociale de la notion de *réensauvagement** et de libre évolution* : modalités et méthodes de mise en œuvre, effets écologiques et sociétaux ;
7. Raffiner concept et méthodes, évaluer les effets de la *gestion adaptative* ;
8. Définir des états de référence : questionner et définir les référentiels ;
9. Poursuivre les recherches sur les *solutions fondées sur la nature** (SFN) et définir des exigences pour le déploiement des approches basées sur les *écosystèmes**.

Face au déclin de la biodiversité et aux réactions sociales que ce déclin engendre (demandes de nature, anti-spécisme, etc.), diverses réponses ont émergé, faites d'initiatives de la société civile (pratiques agricoles alternatives, jardins en ville, etc.), de politiques publiques (espaces protégés, programmes de protection d'espèces, etc.), de stratégies du monde économique (passages à faune sur les autoroutes, bridage des éoliennes, etc.). L'analyse critique de ces réponses et de leurs résultats doit aider à en identifier des perspectives d'amélioration, notamment en termes d'efficacité, pour la protection de la biodiversité. **Des travaux de sciences sociales sur les méthodes de production des connaissances, leur appropriation ou leur rejet par les parties prenantes, les politiques et la société en général sont aussi nécessaires.**

Les problématiques se déclinent selon trois angles d'approches complémentaires : par l'intermédiaire des territoires ; des approches historiques de conservation de la nature ; et des nouvelles « approches basées sur les écosystèmes » ou « solutions fondées sur la nature », explorées successivement.

3.1. La biodiversité dans tous les territoires

Si, historiquement, la protection de la biodiversité s'est largement concentrée sur les espaces « naturels », les initiatives de protection de la biodiversité se déploient aujourd'hui sur tous les espaces, qu'ils soient protégés ou non, ces deux types d'initiatives étant nécessaires et complémentaires, voire synergiques.

Les espaces dits « naturels », où les pressions anthropiques sont historiquement plus faibles,

sont originaux en termes de biodiversité et ont fait l'objet, à ce titre, d'une attention particulière par les politiques publiques et les sciences de la biodiversité, accumulant ainsi une riche expérience écologique et sociale. Les aires protégées qui en ont résulté sont un outil essentiel de protection de la biodiversité, créant des « réservoirs de biodiversité » et des « espaces de résilience ». **L'évaluation de leurs effets, en regard d'autres modalités de conservation est un enjeu fort de recherche.**

FOCUS 8

Protéger la biodiversité des forêts

Les écosystèmes forestiers abritent la plus grande part de la biodiversité terrestre, dont environ 80 % des espèces d'amphibiens, 75 % d'oiseaux et 70 % de mammifères (FAO-UNEP, 2020). Les raisons en sont multiples, incluant : des surfaces importantes (les forêts couvrent 40 % de la surface de l'Europe) et souvent peu fragmentées ; une forte continuité temporelle avec des forêts anciennes présentes depuis des siècles ou des vieilles forêts composées d'arbres de plusieurs centaines d'années ; une grande complexité structurale liée à la stratification de la végétation offrant de nombreuses niches écologiques ; et une moindre pression anthropique que dans les systèmes agricoles.

Protéger les forêts constitue donc un levier important pour la conservation de la biodiversité terrestre. En Europe, plus de 50 % des zones Natura 2000 sont constituées de forêts. En France, de nombreux systèmes de protection de la biodiversité s'appuient sur les espaces forestiers, comme Natura 2000 (20 % des zones), les réserves naturelles (avec une vingtaine de réserves forestières intégrales) et les 246 réserves biologiques gérées par l'Office national des forêts. Cependant, seulement 5 % des forêts européennes sont considérées comme « naturelles » ou « primaires » (exemptes de toute gestion) dont environ 0,05 % en France. Il convient donc de considérer que modifier la gestion des forêts représente également un levier essentiel pour la préservation de la biodiversité. **De nombreuses études ont notamment identifié des mesures favorables au maintien de la biodiversité en forêt, comme la diversité des essences, le volume de bois mort, le nombre d'arbres vieux, de gros diamètre, ou porteurs de microhabitats, l'absence d'intervention systématique après perturbation, la conservation des biotopes rares (comme les mares ou les tourbières), ou le renforcement de la connectivité entre zones boisées au niveau du paysage (Muys *et al.*, 2022).**

Il s'agit d'identifier et de comparer, par des évaluations systématiques, le rôle et l'efficacité : de différents types d'aires protégées mais aussi de celles d'autres mesures de conservation à l'échelle d'écosystèmes ou de paysages hors statut de protection (maintien ou restauration de continuités écologiques comme les trames vertes et bleues, restauration de milieux dégradés, développement d'infrastructures agroécologiques, etc.), ou celles de mesures ciblées sur la diversité génétique, sur des espèces particulières (translocations sauvetages génétiques), sur des fonctions écologiques (le contrôle biologique par exemple).

De par le nombre d'humains présents dans ces espaces et leurs activités, les recherches sur les espaces protégés doivent aussi s'intéresser aux dimensions socio-économiques et éthiques de ces politiques de

Il reste néanmoins encore beaucoup de recherches à mener pour recenser et conserver la biodiversité forestière (Brockhoff *et al.*, 2017). Des groupes taxonomiques importants sont encore trop mal inventoriés en forêt, comme les micro-organismes. Des indicateurs directs ou indirects de biodiversité restent à élaborer pour aider les gestionnaires à évaluer les effets de leur travaux sylvicoles. Les grandes causes de l'érosion de la biodiversité que sont les changements climatiques et les invasions biologiques doivent également être analysées dans les milieux forestiers, en relation avec leur structure et leur composition. La réponse de la biodiversité à l'hétérogénéité des paysages forestiers et à la distribution spatiale des fragments de forêts dans les paysages agricoles ou urbanisés devrait également être mieux étudiée. Enfin, il conviendrait de développer les recherches sur l'effet des politiques publiques sur la préservation de la biodiversité en forêt au moment où des injonctions contradictoires (telles que ne plus couper d'arbres vs construire en bois) agitent le débat dans la société.

protection. Ces dimensions sont diverses : d'une contribution à la durabilité des stocks halieutiques dans le cas des réserves marines, à la préservation et à la promotion de styles de vie durables dans le cas des réserves terrestres, à l'amélioration des moyens de subsistance et des conditions de vie des populations, notamment indigènes. **L'effet des espaces protégés sur leurs marges non-protégées (effets écologiques, mais aussi socio-écologiques, possibilité de solidarité écologique), les modalités de gouvernance de ces espaces, notamment dans un souci de justice environnementale, sont aussi à étudier.** Un enjeu est d'améliorer la répartition spatiale des zones à différents statuts de protection ou objectifs de conservation de la biodiversité, dans un cadre national, européen et mondial, pertinent écologiquement et socialement.

FOCUS 9

Les aires marines protégées

Les aires marines protégées sont des espaces géographiques définis, reconnus, dédiés et gérés pour assurer la conservation à long terme de la nature. Leur efficacité à protéger la biodiversité et à assurer la fourniture de services écosystémiques est bien démontrée. Depuis 1982, la couverture des aires marines protégées est utilisée par les gouvernements pour fixer des objectifs internationaux de protection des océans. Lors de la Conférence des parties de la Convention sur la diversité biologique (2022), les États Parties se sont engagés à recouvrir 30 % des zones côtières et marines par des aires marines protégées (ou autres mesures de conservation efficaces par zone). Cependant, les aires marines protégées, qui sont rapportées par les États membres, présentent une grande diversité d'étapes de mise en place et de niveaux de protection.

Les scientifiques soutiennent que les engagements politiques sur la mise en œuvre des aires marines protégées et leur établissement effectif devraient être améliorés. Avec l'augmentation du taux de perte de biodiversité et des fonctions écosystémiques due à la surpêche, aux changements d'usage de la mer, à l'invasion d'espèces, à la pollution et au changement climatique, la communauté scientifique appelle à une amélioration de la conservation marine. Démontrant que la plupart des avantages documentés des aires marines protégées proviennent des aires marines protégées sans activités extractives, les scientifiques soulignent également la nécessité de distinguer les différents niveaux de protection des aires marines protégées, en fonction des restrictions qu'elles imposent. Les niveaux de protection les plus élevés - c'est-à-dire des zones entièrement et hautement

protégées qui restreignent strictement les activités extractives dans les limites des aires marines protégées, lorsque ces zones sont mises en réseaux, et lorsque les parties prenantes sont intégrées dans leur gouvernance - sont les plus efficaces et demandent à être mis en œuvre dans une proportion plus large pour conserver la biodiversité marine et assurer la fourniture de services écosystémiques originaux.

En résumé, les enjeux sont donc de poursuivre les recherches pour contribuer à améliorer leur gestion et leur niveau de protection tout en s'assurant qu'elles contribuent à la fois à la conservation de la biodiversité et au bien-être des populations, notamment par leurs effets positifs sur les ressources pour les zones adjacentes.

En complément des approches classiques de protection de la biodiversité à travers les aires protégées, une nouvelle approche à large spectre est proposée par l'entremise des *autres mesures de conservation efficaces par zone** (ou *Other Effective Area-based Conservation Measures*), des zones de conservation de la connectivité et outils de conservation innovants. Il importe d'examiner les effets de telles mesures, qui explorent de nouvelles relations entre humains et non-humains dans les territoires en intégrant d'emblée les questions de développement, y compris les questions relatives aux droits humains, aux garanties sociales dans la conservation de la biodiversité.

Ces nouvelles ambitions exigent l'émergence de concepts et de méthodes associés à la protection de la biodiversité et à la « nature ordinaire ». Ces espaces non protégés doivent d'une part être considérés comme une matrice incluant les espaces protégés, représentant des surfaces bien plus importantes que les espaces protégés. Ils sont aussi très divers : milieux agricoles, zones urbaines et péri-urbaines,

zones de pêche et littorales, etc. ; et abritent une part importante de la biodiversité parfois qualifiée « d'ordinaire ». Ces espaces favorisent ou empêchent les mouvements entre les aires protégées. Leur rôle doit donc aussi être envisagé en termes d'effets de bordure ou de connectivité entre les espaces protégés, et plus généralement entre habitats, permettant le déplacement ou la migration des espèces et prévenant l'isolement génétique. Cela suppose de bien comprendre les capacités de dispersion et de déplacement des individus, des populations, à l'échelle des paysages terrestres et aquatiques (voir Axe 1). Il s'agit de concevoir des corridors écologiques et d'améliorer la qualité de la matrice paysagère par la préservation et la conception des infrastructures vertes, bleues et autres : « trame noire » (pour la biodiversité nocturne face aux pollutions lumineuses), « trame brune » (pour la biodiversité des sols), qui dépend aussi de l'agencement des aires protégées dans le paysage.

Ensuite, ces espaces non protégés portent des enjeux de biodiversité en soit : protection de la biodiversité ordinaire (insectes et oiseaux communs, etc.), des fonctions écologiques, services écosystémiques, associés. **L'objectif de protection de l'intégrité*, de la connectivité et de la résilience des écosystèmes (voir objectif A du Cadre mondial de la CDB), décliné en termes de composition, structure et fonctions des écosystèmes, porte des perspectives de recherches importantes, en relation avec la logique des systèmes de production, l'écologie urbaine.** Ces enjeux sont aussi abordés à travers les *approches basées sur les écosystèmes** (voir Point 3.3).

3.2. Évaluer et améliorer les modalités de protection et de restauration de la biodiversité

Ces modalités se sont considérablement enrichies récemment, par une approche plus large du vivant, de ses processus dynamiques, que ce soit les processus évolutifs et/ou les réponses aux changements globaux, des ensembles écosystémiques qu'il constitue.

Portée écologique, évolutive et sociale des notions de *ré-ensauvagement** et de *libre évolution**

Le ré-ensauvagement consiste à redonner à un écosystème son caractère sauvage, une liberté de trajectoire et/ou ouvrir des possibilités d'adaptation dans des espaces dans lesquels la biodiversité évoluerait largement indépendamment des interventions humaines, conduisant à la notion de « libre évolution » de ces systèmes. Les recherches doivent aider à définir les critères, la portée sociale et anthropologique des notions, des actions et des conséquences qu'elles impliquent, à l'échelle des populations, des communautés et des fonctions écologiques des écosystèmes. Elles doivent également étudier les modalités et méthodes de ré-ensauvagement qui soient efficaces ainsi que leur lien avec les approches de restauration écologique.

Dans une approche plus interventionniste de la gestion et de la restauration de la biodiversité, des mesures de « ré-ensauvagement fonctionnel » (incluant la restauration de populations, les translocations, c'est-à-dire des mesures incluant les réintroductions, les renforcements, les migrations et flux de gènes assistés - voire la notion de remplacements écologiques) sont proposées et parfois mises en place. Les contextes sociaux et juridiques mais aussi des questions éthiques, peuvent faciliter ou contraindre ces pratiques (norme fixe, responsabilité vis-à-vis des usagers, etc.), et doivent donc être étudiés.

Ces options peuvent être réservées aux espaces particuliers que sont les espaces protégés (voir Point 3.1.) mais elles peuvent aussi avoir des rôles dans les stratégies générales de préservation et de restauration de la biodiversité ou de compensation écologique dans tout territoire.

*Gestion adaptative**

Les actions de protection de la biodiversité se placent de plus en plus dans un contexte de *gestion adaptative** ou de *gestion apprenante**. Ces approches se caractérisent par la formalisation scientifique, l'expérimentation, le suivi et la participation des parties prenantes, impliquant des boucles de rétroaction qui contribuent à identifier et à gérer les sources d'incertitudes et les complexités inévitablement associées aux dynamiques sociales et environnementales. **Cette stratégie d'apprendre « en faisant », exigeante conceptuellement et méthodologiquement, demande un effort transdisciplinaire.** Souvent mises en avant politiquement, ces approches restent donc complexes à mettre en œuvre et peu d'exemples de succès sont disponibles dans la littérature scientifique. L'analyse critique des succès et échecs est à conduire pour améliorer les pratiques.

Définition des états de référence

Restauration écologique et ré-ensauvagement, *gestion adaptative** et autres mesures de conservation par zone ont pour objectif de restaurer des entités (espèces, communautés, écosystèmes, réseaux, etc.), des fonctions écologiques altérées ou perdues suite à des perturbations anthropiques. Cela implique la définition de référentiels (patrimoniaux, culturels, fonctionnels, phylogénétiques, de cible mouvante, etc.), qui permettent de fixer des objectifs de restauration. **Établir de telles définitions demande des réflexions conceptuelles et méthodologiques sur les notions d'« état de référence » et de sa dérive (« amnésie environnementale » ou « *shifting baseline* »).** D'autres termes largement utilisés dans les cadres internationaux et nationaux de protection de la biodiversité accompagnent souvent ces réflexions et se font aussi leur place dans le champ lexical de la restauration : « condition écologique favorable », « bon statut écosystémique ou de biodiversité », état « d'intégrité écologique », etc. Ces travaux doivent intégrer l'histoire et le temps long, les effets des changements globaux, le cadre réglementaire existant ou à faire évoluer. Il convient ainsi de questionner les objectifs des actions sachant les changements globaux en cours et à venir. Par exemple : faut-il restaurer des structures passées ? maximiser des potentialités futures ?

3.3. « Approches basées sur les écosystèmes » : répondre à plusieurs enjeux environnementaux et aux besoins humains

Assumant la nécessité de combiner protection de la biodiversité et réponse aux besoins humains, les *approches basées sur les écosystèmes** ou *solutions fondées sur la nature** (SFN) ont été proposées par la Convention pour la diversité biologique (CDB). Elles se basent sur la prise en compte des propriétés écologiques et évolutives des non-humains par les humains. Elles concernent tous les écosystèmes, aussi bien « naturels » que « semi-naturels » ou « anthropisés », et explorent les possibilités de restauration, de modification, voire de création de « nouveaux » écosystèmes, faisant appel à une gamme de processus, y compris des interventions humaines minimales.

Ces approches basées sur les écosystèmes* sont des solutions systémiques : elles nécessitent de s'appuyer sur les connaissances fines du fonctionnement des écosystèmes en relation avec la diversité biologique (voir Axe 1), de prendre en compte les rétroactions entre humains et non humains à l'échelle des socio-écosystèmes et aux niveaux local et global (voir Axe 2).

Elles doivent ainsi intégrer :

- les rôles fonctionnels de la biodiversité à différentes échelles d'organisation du vivant (individu, population, communauté, paysage),
- leurs potentialités, limites et inconvénients (risques pour la santé en raison d'une exposition plus élevée à des réservoirs pathogènes ou à des espèces vectorielles...),
- les mécanismes impliquant les organisations sociales, le type de gouvernance favorisant ou obérant leur déploiement,
- et les enjeux éthiques, représentationnels et sociaux associés à l'ambition de combiner réponse aux besoins humains locaux et/ou globaux et protection de la biodiversité (voir Axe 4).

Une grande partie de ces connaissances nécessaires font aujourd'hui défaut et impliquent des recherches dédiées.



Axe 4.

Identifier les réponses systémiques : changement transformateur et mesures leviers



④ L'axe 4 en un coup d'œil...

Cet axe identifie onze directions majeures :

1. Analyser les controverses dans la diversité des relations entre humains et non-humains et systèmes de valeurs associés (voir notamment « *Nature Future Framework* ») ;
2. Saisir les dynamiques d'évolution des valeurs ;
3. Mettre en œuvre des évaluations robustes respectant la diversité des valeurs ;
4. Travailler les nouveaux modes de gouvernance, les notions de « gestion adaptative », de « communs » ;
5. Étudier les conditions de mise en place de mesures d'atténuation des pressions et des impacts ;
6. Appréhender les approches *nexus** : dépasser les approches sectorielles ;
7. Mesures leviers et changements transformateurs : étudier la diversité des interactions (mécanismes techniques, économiques et juridiques, gouvernance) entre la société et la biodiversité, les écosystèmes ;
8. Étudier la résilience des socio-écosystèmes : voies possibles, pièges, réorganisations ;
9. Co-construire des trajectoires de développement répondant aux 3 piliers de la Convention sur la diversité biologique (CDB) ;
10. Comprendre les ressorts et les impacts sur la biodiversité des *chaînes globales de valeurs**, du commerce international et identifier les *télécouplages** ;
11. Proposer des nouvelles déclinaisons pour l'accès et le partage des avantages.

Les sociétés humaines - à toutes les échelles d'organisation, des individus aux pays en passant par les institutions et les entreprises - réagissent aux dynamiques de la biodiversité. Lorsqu'une ressource naturelle devient plus rare par exemple, et/ou que la biodiversité présente est dégradée, cela peut conduire à accentuer les pressions qui s'exercent sur elle, à déplacer la pression sur une ressource jusqu'alors inexploitée ou, au contraire, à prendre des mesures de protection nouvelles, changer de modes de production, adopter des styles de vie plus sobres, etc. La compréhension des mécanismes économiques, sociaux et culturels susceptibles d'affecter ces décisions (facteurs indirects de l'Ipbes) est fondamentale pour engager les transitions des systèmes socio-écologiques, autrement dit proposer des mesures réalistes pour stopper la perte de biodiversité.

4.1. Diversité des valeurs associées aux relations entre humains et non-humains

Les humains ont développé des relations très diverses avec la biodiversité et les écosystèmes, avec une diversité de valeurs associées. L'Ipbes considère ainsi que l'on peut vivre « de », « avec », « comme » ou « dans » la nature. Le « *Nature Future Framework* » (NFF) de l'Ipbes distingue quant à lui trois types de relations à la nature :

- la nature « pour la société et les humains » ;
- la nature « pour elle-même » ;
- et la nature « comme culture ».

Ces notions renvoient à celles de services écosystémiques ou de contributions de la nature aux sociétés, de valeurs intrinsèques de la nature et d'harmonie entre les sociétés

humaines et la nature, de styles de vie. Autant de notions qui ont suscité des controverses portant sur les méthodes d'évaluation et les indicateurs utilisés, leurs impacts sur les sociétés, leur opérationnalisation dans la conception et la mise en œuvre des politiques de protection. L'analyse de ces controverses doit aider à construire des mesures et des actions en faveur de la biodiversité qui soient réalistes et socialement acceptables.

Au-delà de leur diversité, les valeurs liées à la nature varient dans le temps et l'espace, selon les territoires et les contextes. Il est ainsi important d'en saisir les dynamiques d'évolution sur des temps courts ou plus longs, en s'appuyant sur l'anthropologie, l'écologie historique et l'archéologie. La notion de *diversité bioculturelle** permet quant à elle de saisir l'ancrage culturel et le caractère nécessairement situé des rapports à la nature.

FOCUS 10

La comptabilité écologique

La lutte contre l'érosion de la biodiversité implique de questionner la possibilité d'organiser différemment nos modes de vie et de production. Dans cette perspective, il semble nécessaire de s'interroger sur l'information pertinente à produire pour accompagner le changement, ce qui est un rôle de la comptabilité. Depuis les années 1990, la recherche en comptabilité socio-environnementale s'interroge sur la manière dont les systèmes comptables peuvent aider les organisations à faire apparaître l'importance, respecter les écosystèmes et la biodiversité.

Ce champ couvre aujourd'hui un ensemble de systèmes très hétérogènes allant du développement de systèmes de reporting extra-financier associé aux politiques de *responsabilité sociétale des entreprises (RSE)* à des propositions plus ambitieuses d'intégration de la biodiversité dans la comptabilité financière (voir le

modèle *Care*, « *Comprehensive Accounting in Respect of Ecology* »).

Au-delà des organisations, la recherche sur la comptabilité écologique se décline à l'échelle de la nation en soutien à l'élaboration et l'évaluation des politiques publiques et à l'échelle des territoires en soutien à la négociation entre acteurs autour de ressources partagées. De par son caractère performatif, c'est-à-dire sa capacité à produire des effets organisationnels et institutionnels, la comptabilité écologique peut accompagner les transformations nécessaires pour la conservation de la biodiversité. Ce champ nécessite des recherches interdisciplinaires pour intégrer la biodiversité et les écosystèmes dans des systèmes de comptes robustes et appropriables par les organisations.

4.2. Modes de gouvernance, stratégies d'acteurs, conflits d'usages

La dynamique de la biodiversité dépend de la façon dont ses valeurs sont intégrées dans la société. La crise actuelle est le reflet de la prédominance des valeurs de marché qui favorisent les bénéfiques à court terme. Il est donc nécessaire de créer les conditions pour que la diversité des valeurs de la biodiversité soit reconnue et intégrée à tous les niveaux de la prise de décision. **Dans cette perspective, il est nécessaire de mettre en œuvre des évaluations qui respectent la diversité des valeurs, basées sur des méthodes robustes, des indicateurs partagés et adaptés au contexte.** De telles évaluations permettent d'appuyer les arbitrages en faveur de la biodiversité dans l'élaboration des politiques publiques (réglementation, fiscalité) et dans les stratégies des acteurs à l'échelle des organisations (comme les investissements, les politiques d'achat – voir Focus 8) ou des individus (comme les modèles de consommation alternatifs - voir Focus 10).

La prise en compte de cette diversité des valeurs nécessite la conception de nouveaux modes de gouvernance qui facilitent la participation et l'engagement des diverses parties prenantes, notamment des peuples indigènes et des communautés locales dont les préoccupations sont souvent ignorées. La spécificité et la complexité de

l'objet biodiversité et les niveaux d'incertitude associés à sa gestion militent pour des modes d'organisation à l'échelle des écosystèmes qui soient suffisamment flexibles pour favoriser l'apparition de dynamiques de *gestion adaptative** (voir Axe 3, apprentissage collectif, renégociation des objectifs, résolution des conflits). La notion de « communs », la (re)découverte de leur diversité et modes de gouvernance, selon les contextes sociaux et écologiques, doit aider à penser et aborder les rôles respectifs des politiques publiques, de la régulation économique et financière, des initiatives de la société civile (modèles de consommation, modes de vie alternatifs, nouveaux récits, etc.) et des pratiques locales. Les effets des politiques de protection sont le résultat d'un processus de diffusion dans des territoires ayant des configurations sociales et environnementales diverses. Les politiques y sont appropriées par des acteurs ayant des systèmes de valeurs et des intérêts variés, parfois divergents.

L'analyse de ces processus d'appropriation, de la construction de la politique à sa mise en œuvre sur les territoires, est un enjeu de recherche important pour améliorer leur impact sur la biodiversité.

Cette analyse implique l'**étude des conditions de mise en place de mesures d'atténuation des pressions et des impacts, de compensation écologique, d'internalisation des externalités, élaborées par différents types d'acteurs, à différentes échelles** (voir Point 4.4.). Elle ne doit pas se limiter aux politiques dédiées (telles que la compensation écologique ou les aires protégées) : il s'agit d'intégrer la biodiversité dans la construction et la mise en œuvre de toutes les politiques publiques, dans toutes leurs mesures y compris le non-usage de la biodiversité. Il importe de comparer les effets attendus et observés, selon la manière dont ces stratégies ou actions intègrent, ou non, différents enjeux et valeurs, différentes parties prenantes (voir Point 4.4.), y compris celles des peuples indigènes et des communautés locales. L'enjeu est de parvenir à décliner des stratégies territoriales aux différentes échelles, du local au planétaire, qui soient efficaces et cohérentes.

4.3. Construire des transitions : notions de « nexus », de « changement transformateur » et de « mesures levier »

Pour que des transitions soient possibles, il faut que les sociétés prennent la mesure des différentes valeurs de la biodiversité (voir Point 4.1.), les intègrent pleinement dans tous les sujets de développement durable, notamment la transition énergétique dans le

contexte du changement climatique (voir Focus 11).

L'approche *nexus** aborde de front les différents enjeux environnementaux - climat et énergie, agriculture, eau et alimentation, santé - en reconnaissant les multiples interactions et les rétroactions entre eux ainsi que le rôle systémique de la biodiversité dans la relation entre ces enjeux. Cette approche dépasse les approches sectorielles de la réduction des pressions (voir Axe 2) pour les remplacer par des solutions plus intégrées. À l'échelle des territoires, la recherche de compromis entre différents usages des terres et différents besoins met en exergue les tensions et les synergies possibles. Par exemple, adopter des pratiques agricoles qui permettent de capter du carbone dans les sols agricoles permet de freiner les changements climatiques mais aussi d'améliorer la fertilité des sols et de protéger la biodiversité. **Cette approche *nexus** fait donc apparaître des besoins de recherche pour l'identification et l'évaluation des synergies et des arbitrages, de méthodologies d'intégration de différents enjeux, parfois antagonistes, dans la prise de décision.** Ces recherches aux interfaces des enjeux socio-économiques, culturels et de biodiversité doivent ainsi aider à dégager des options pertinentes, sous la tension de multiples contraintes : préservation de la biodiversité, lutte contre les changements globaux, transformation des modes de production et de consommation pour soutenir le bien-être humain.

FOCUS 11

La transition énergétique bas-carbone

Cette transition exige de mieux évaluer et de réduire les impacts directs et indirects des modes de production d'énergie bas carbone sur les écosystèmes – en termes d'occupation des sols, de destruction d'habitat, de besoins en matières premières et métaux et de modes de consommation. Par exemple, les fermes éoliennes peuvent réduire les territoires de chasse des chauves-souris et les barrages hydroélectriques empêchent la migration de poissons, comme les esturgeons. Ces effets demandent à être étudiés dans le temps, afin de mettre en évidence des « effets retards », qui peuvent aussi être des stratégies d'adaptation des compartiments du vivant affectés.

Les effets des infrastructures de transport de ces énergies, selon leur distribution, en relation avec la distribution de l'habitat humain, sont un autre sujet d'importance. Il faut aussi amorcer et approfondir la réflexion sur l'utilisation de l'énergie et la diminution de la consommation par les secteurs économiques (dont l'agriculture) et les ménages ; En quoi ces productions bas-carbone facilitent, ou compliquent, cette réduction de la consommation, à quel type d'énergie elles se substituent selon les territoires, leurs relations avec les styles de vie, leur sobriété, déterminant ainsi indirectement leurs impacts sur la biodiversité.

Changement transformateur et mesures leviers*

Les notions de *changement transformateur** et de *mesures leviers** proposées par l'Ipbes ont pour but d'aider à repenser les mécanismes techniques, économiques et juridiques (y compris le droit fiscal) qui encadrent les différentes manières de produire, de consommer, etc. Ces mesures leviers* sont des changements d'approche, des interventions d'ambition systémique, et ainsi susceptibles d'affecter fortement les résultats finaux. L'étude de la diversité des interactions entre la société et la biodiversité, les écosystèmes doit permettre d'identifier des points d'intervention systémique clés, leurs aptitudes de mise en œuvre par leur capacité à entraîner la participation et la prise de décision, à faire émerger des arrangements institutionnels qui facilitent la mobilisation, l'intervention et l'apprentissage des acteurs, et à entraîner leur engagement. Il importe à la fois d'élucider les points de blocage pour parvenir à des changements et de produire une feuille de route des voies de transformation. **Un enjeu est d'analyser dans quelles mesures les institutions facilitent ou empêchent les transformations, et de les aider à se transformer.**

Les sciences participatives et citoyennes ont un rôle important à jouer dans ce domaine. Elles contribuent aussi à la définition et à la priorisation des enjeux à des échelles où les humains sont très présents et où de nombreuses approches scientifiques sont possibles, à l'échelle des écosystèmes, des paysages, etc. Ce sont aussi de formidables outils de sensibilisation à ce qu'est la biodiversité, à la construction des problématiques, à la définition des enjeux politiques et sociaux, et de recherche de solutions innovantes chez les praticiens (agriculture, etc.) (voir Axe 5).

Autre point, les scénarios sont essentiels pour envisager ces questions transformationnelles, les interactions entre les enjeux. Pour concevoir puis agir, les acteurs ont besoin d'une idée des futurs possibles et des futurs souhaités ou souhaitables afin d'anticiper ce que seront leurs difficultés, les risques associés, mais aussi les opportunités. L'analyse des risques et opportunités peut se manifester, par exemple, par l'anticipation des pertes de rendements agricoles dues à la perte de biodiversité du sol et aux sécheresses, ou par les bénéfices des aires protégées en termes de santé humaine. Les scénarios fournissent des langages et concepts communs afin de penser les événements passés et à venir (voir Axe 5). Ces langages sont construits *via* des outils d'exploration et de projection de futurs plausibles - n'étant ni des prédictions, ni des constructions consensuelles de ce que le futur devrait être - notamment dans un cadre participatif.

4.4. Contribution nationale à la protection de la biodiversité mondiale et limites planétaires

La protection de la biodiversité mondiale et, plus globalement, le respect des *limites planétaires** (voir Point 2.1.) exigent des actions concertées et une coopération à l'échelle mondiale sur le long terme pour réduire les impacts des activités humaines sur la biodiversité, notamment dans les pays tropicaux riches en biodiversité (référence par exemple à la déforestation importée). Les interactions entre pays et entre échelles de gouvernance, globale et nationale, affectent souveraineté et responsabilité en matière environnementale. Il est donc important de co-construire et d'envisager, avec l'ensemble des acteurs impliqués, des trajectoires de développement permettant à la fois de préserver la biodiversité, de parvenir à son utilisation durable et d'assurer un accès équitable à la nature et à la biodiversité, les trois objectifs de la Convention sur la diversité biologique (CDB).

Le Cadre mondial de la biodiversité de la CDB, avec ses 4 objectifs et ses 23 cibles, offre un cadre universel et souple qui permet à chaque pays signataire d'adapter ses politiques selon ses enjeux et contraintes. Des déclinaisons européenne et nationale à la fois ambitieuses et pertinentes sont donc fondamentales pour la réussite de cet accord, ce qui concerne notamment les *chaînes globales de valeurs** - les ressources génétiques, deux enjeux détaillés ci-après.

Chaînes globales de valeurs, commerce international

Les différents socio-écosystèmes de la planète sont *télécouplés** : c'est-à-dire connectés économiquement, écologiquement et socialement, notamment à travers les *chaînes globales de valeurs**. La déforestation importée en est un exemple : elle peut se manifester par des coupes de bois au Canada pour satisfaire la filière bois-énergie en Europe alors que les forêts en Europe voient leur surface augmenter. Un autre exemple est la demande en terres agricoles pour fournir l'Europe en bio-carburants, fourrages (soja), huile de palme, qui implique de déforester davantage les forêts tropicales.

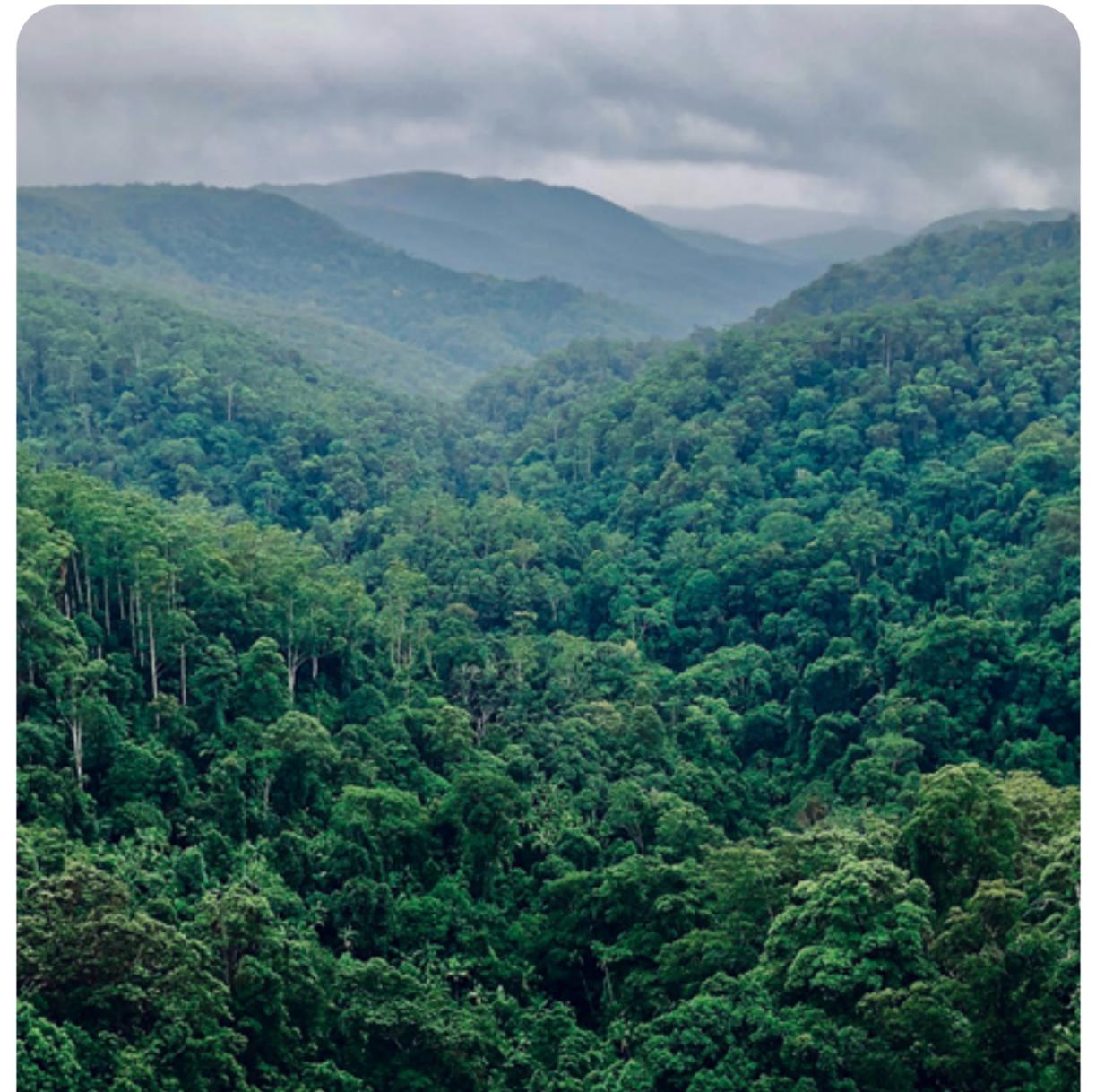
La maîtrise et la réduction de la production des biens et services ayant un impact négatif sur la biodiversité mondiale exige l'analyse de ces *télécouplages**, la compréhension de l'impact respectif des accords commerciaux, bilatéraux et multilatéraux, de la législation, notamment des échanges internationaux de biens et de services. **Ces connaissances peuvent alimenter des scénarios sur les effets de mesures leviers* sur ces échanges, à travers l'intégration des effets socio-économiques en cascade de l'agriculture, de la santé, de la foresterie et de la pêche, des modes de vie, etc.**

4.5. Ressources génétiques, nouvelles technologies et accès et partage des avantages : vers de nouvelles déclinaisons

Les ressources génétiques (matériel végétal, animal, microbien ou autre contenant des unités fonctionnelles de l'hérédité, y compris leur codage numérique), leur diversité, leur répartition et leurs modalités d'accès et d'utilisation sont un moteur fondamental de la dynamique des socio-écosystèmes. Elles sont utilisées pour la production (dans les systèmes agricoles, halieutiques et aquacoles, ou forestiers par exemple), par l'industrie, pour la santé, par la recherche, etc. ce qui a des effets systémiques.

Accès et partage des avantages : proposer de nouvelles déclinaisons

Le partage juste et équitable des avantages issus de l'exploitation des ressources génétiques (par l'accès et le transfert de technologie) est un des trois objectifs de la CDB. **Les effets des dispositifs d'accès et de partage des avantages (APA) pour la recherche, et sur les sociétés, d'un point de vue culturel et environnemental restent encore largement à documenter.** Cela requiert de comparer entre eux les différents dispositifs nationaux existants, internationaux et multilatéraux, et d'en évaluer les effets pour différents acteurs et dans différentes régions du monde. **Il est surtout indispensable d'élargir la mention aux ressources génétiques, au-delà des informations numériques (DSI), en y intégrant la biomasse et les services écosystémiques, dont les bénéfices sont aujourd'hui très inégalement répartis, ouvrant de plus larges perspectives à cette notion d'échange équitable.**



Axe 5.

Infrastructures de recherche nécessaires aux sciences de la biodiversité



L'axe 5 en un coup d'œil...

Cet axe identifie dix directions majeures :

1. Développer, reconnaître, mettre en relation les systèmes d'observation pérennes engageant différents modes de collectes de données ;
2. Améliorer et documenter les collections physiques et bases de données, stockage et accès ;
3. Adopter des principes FAIR : Findable, Accessible, Interoperable, Reusable ;
4. Conforter ou développer des infrastructures dédiées aux techniques de synthèse, d'analyse et de valorisation des jeux de données ;
5. Encourager la synthèse de connaissances, à travers les méthodes adaptées ;
6. Utiliser les avancées en intelligence artificielle ;
7. Intégrer un ensemble d'hypothèses cohérentes quant à la nature des forces et entités régissant les dynamiques de la biodiversité, leurs interactions (incluant évolution des espèces, nouveaux assemblages ou conditions environnementales sans analogues dans le présent) ;
8. Explorer l'incertitude associée aux systèmes adaptatifs complexes ;
9. Co-développer avec les acteurs (processus participatifs), éclairer la décision ;
10. Améliorer l'inclusivité des approches et des méthodes scientifiques, le partage des avantages.

Les problématiques de recherches précédentes exigent des infrastructures à la hauteur de l'ambition. Cela concerne au premier chef des actions structurantes de la communauté de recherche nationale (observation et bases de données, analyses et modélisations, scénarisation, interdisciplinarité, etc.). En se plaçant dans un contexte international, il s'agit aussi de conforter les liens avec les organisations et des infrastructures de recherche à cette échelle telles que Geo-Bon, GBIF, eLTER, Eklipse, etc.

En termes de transdisciplinarité, il s'agit d'améliorer les échanges avec les parties prenantes. Les priorités devraient ainsi inclure la mise en place de partenariats et de missions communes, tel le *Knowledge Centre for Biodiversity (KCBD)* de la Commission européenne, chargé de favoriser le dialogue politique intersectoriel pour des prises de décision efficaces tenant compte de la biodiversité.

5.1. Observation de la biodiversité : collecte, organisation et mise à disposition des données et des ressources

Le développement, la reconnaissance et la mise en relation des différents réseaux de systèmes d'observation, d'information des variables essentielles de biodiversité (voir Focus 1) sont un objectif majeur. Les questions scientifiques contemporaines demandent à combiner de multiples données issues de méthodes d'observation (incluant l'expérimentation) à différentes échelles (des inventaires et suivis à la télédétection

en passant par les enregistrements à haute fréquence) et pour différentes sources (des observatoires académiques aux sciences citoyennes en passant par les observatoires naturalistes). Les systèmes assurant l'observation et le suivi d'éléments de la biodiversité doivent se déployer avec un échantillonnage représentatif, aux différents niveaux d'organisation et échelles spatiales, pertinentes, sur des pas de temps pluridécennaux. Les lacunes spatiales et les ruptures temporelles ou méthodologiques dans les suivis réduisent leur potentiel de documentation de changements et certaines possibilités d'analyse.



Ces observatoires devront parfois faire appel à de nouvelles technologies, des systèmes automatisés ou semi-automatisés de collecte de données (capteurs, sondes, pièges à invertébrés non destructifs avec reconnaissance automatique des espèces, véhicules télécommandés, robots d'échantillonnage). Ils peuvent impliquer des plateformes spécifiques (métagénomique, génomique environnementale par exemple) et des applications informatiques pour l'analyse des données, s'appuyant sur les statistiques ou l'intelligence artificielle et permettant la construction de plan d'échantillonnage optimaux. Trois enjeux sont à distinguer : la collecte, le stockage pérenne et l'accès aux données et ressources (voir Point 1.1.).

Systèmes d'observation pérennes engageant différents modes de collectes de données

Les méthodes de collecte de données et de spécimens sont diverses : inventaires et suivis, missions d'exploration, réseaux organisés, etc. Leur déploiement demande des infrastructures de stockage, de mises en collection et de mises à disposition des données ainsi que, le cas échéant, des échantillons physiques. La constitution de collections et bases de données de référence (comme le matériel biologique prélevé sur des plantes, des animaux, les matrices environnementales) datées et documentées est nécessaire pour garantir la comparabilité des résultats, permettre l'analyse *a posteriori* des évolutions dans le temps et dans l'espace, mais aussi pour réexaminer ces données, échantillons ou matrices avec de nouvelles technologies. **Les conditions de collecte et de stockage pérenne,**

limitant les dégradations par les manipulations ou le temps, nécessitent d'être améliorées. Ces collections doivent aussi être accompagnées d'une documentation précise, les données associées contribuant à leur valeur (métadonnées, données d'analyse, etc.).

Stockage et accès aux collections physiques et bases de données : les métadonnées

Le volume de données générées par l'observation et l'expérimentation et requises pour l'analyse demande des capacités de stockage, de flux et des puissances de calculs sans cesse plus importants, des développements techniques et instruments associés. De plus, les innovations, organisationnelles et technologiques, conduisent à une grande diversité des sources et de formats de données.

L'amélioration du partage des données, à travers leur ouverture et leur accès, exige de mieux harmoniser les données et les métadonnées associées en vue d'une meilleure (ré-)utilisation. Il s'agit ainsi d'éviter les problématiques liées aux « *dark data* », ces données scientifiques non-réutilisables, perdues dans des collections ou des bases de données inaccessibles. Le "porter à connaissance" des potentiels utilisateurs est essentiel : il se fait sous forme de « métadonnées » afin de faciliter l'accès aux données d'observation, de collection et d'expérimentation – voir en cela les travaux initiés par le Pôle national de données de biodiversité (PNDB).

5.2. Synthèses des données et analyses pluridisciplinaires

Les enjeux sont de mettre en relation des bases de données diverses et de parvenir à l'intégration et la synthèse de données hétérogènes afin de procéder à des analyses conjointes. Ce qui exige des infrastructures dédiées aux techniques de synthèse, d'analyse et de valorisation des jeux de données, parfois de grande ampleur.

Un autre enjeu est le développement de la culture de la synthèse et de la collaboration, en facilitant les liens entre toutes les disciplines scientifiques et avec les acteurs de la société. Ces mises en relation, synthèses conjointes, sont nécessaires notamment à l'étude des processus et des rétroactions sociales-écologiques régissant les dynamiques de la biodiversité et à la construction d'indicateurs caractérisant les pressions et leurs effets en termes d'impacts sur le vivant (empreinte écologique, biocapacité, etc.), l'efficacité

des politiques publiques, des initiatives du monde économique et de la société civile, etc.

Dans ce domaine, il existe d'ores et déjà le Centre de synthèse et d'analyse sur la biodiversité (le Cesab, programme phare de la FRB) : structure d'accueil et de soutien de la recherche au rayonnement international. D'autres méthodes de synthèse de connaissances demandent à être encouragées : revues systématiques et méta-analyses de la littérature scientifique (voir à l'échelle européenne les travaux d'Eclipse).



5.3. Développer des modèles et scénarios dédiés au pilotage des transitions

Des infrastructures, plateformes, de modélisation et de scénarisation (modèles de réseaux, modèles spatio-temporels, construction d'indicateurs de biodiversité, etc.) sont aussi nécessaires et complémentaires. L'intelligence artificielle, tant pour l'apprentissage automatique pour l'analyse des informations (décryptage des interactions, inférences à des types de végétation ou à la biomasse, identification automatisée des espèces, etc.) et la modélisation multi-acteurs, pourrait être aussi un apport méthodologique significatif, améliorant la portée des infrastructures précédentes.

Afin de devenir des descriptions plausibles du futur, les scénarios doivent affronter deux problèmes méthodologiques majeurs :

- **Parvenir à intégrer un ensemble de données permettant des hypothèses cohérentes** quant à la nature des forces et entités régissant les dynamiques de la biodiversité, leurs interactions, et ce, de manière suffisamment fine pour pouvoir en tirer des conclusions sur la biodiversité. Cela exige notamment d'en savoir plus que simplement les futures surfaces en zones agricoles, forestières urbaines, et de documenter aussi les changements de pratiques.
- **Savoir explorer l'incertitude associée aux systèmes adaptatifs complexes.**

Construire des scénarios suppose ainsi la mise en relation des observations, modèles et concepts des différents disciplines, sciences de la nature, sciences humaines et sociales, donc des efforts interdisciplinaires majeurs dans le domaine des données (voir Point 5.2.) et modèles. Ainsi, les écologues restent encore trop peu impliqués dans la création de scénarios de changements d'usage des sols réalistes et compatibles avec leur évaluation en termes d'impacts sur la biodiversité ou de rétroactions avec celles-ci.

Ces scénarios nécessitent donc la mise en place de méthodes et plateformes facilitant développement, parangonnage (ou *benchmarking*), comparaisons, intégration de divers modèles. Ces modèles doivent dépasser le simple usage de corrélations et de relations figées entre conditions environnementales et état de la biodiversité (tels que les modèles de niches), qui ne permettent notamment pas d'intégrer des contraintes d'évolution des espèces, de nouveaux assemblages ou de conditions environnementales sans analogue dans le présent.

Ces travaux de scénarisation doivent s'inscrire, en termes méthodologiques, dans un cadre participatif élargi, faisant intervenir l'ensemble des parties prenantes. De nouvelles procédures de consultation, de mise en forme et de mise en relation des différents corpus de connaissances - scientifiques, vernaculaires, autochtones - sont nécessaires, tenant compte des différentes échelles de temps qui régissent les dynamiques des espèces, y compris de l'espèce humaine.

5.4. Sciences participatives, sciences citoyennes : des complémentarités à développer

Les sciences de la biodiversité exigent des approches transdisciplinaires, de par les enjeux humains soulevés par la dynamique de la biodiversité.

Dans ce cadre, le développement des sciences et recherches participatives ainsi que des sciences citoyennes, très présentes dans le domaine de la biodiversité, répondent à cette exigence en favorisant l'inclusivité des parties prenantes, donc des approches et des méthodes, et la combinaison des savoirs scientifiques et vernaculaires. En d'autres termes, en permettant à de nouveaux publics de participer à la recherche, notamment les naturalistes, elles contribuent à une pratique des sciences plus démocratique et plus représentative de l'ensemble des publics, elles permettent de lutter contre l'entre-soi, de mieux intégrer des préoccupations de justice environnementale. Les dispositifs sont divers (par exemple eBird, AntWeb, Pl@ntNet).

De plus, ces réseaux de bénévoles et d'associations fournissent une puissance d'observation distribuée sur l'ensemble des territoires, métropolitain et ultra-marin, et bénéficiant, de surcroît, de savoirs naturalistes vernaculaires précieux, contribuant directement au développement des infrastructures de recherches. Au-delà des données, et parfois de leur analyse critique, ces réseaux contribuent à la réalisation d'indicateurs de biodiversité (tel que le Suivi temporel des oiseaux communs, Stoc), des choix de modélisation et de scénarisation. **L'investissement de la recherche - proposant des outils, des valorisations, des moyens matériels et institutionnels - est nécessaire au maintien et à l'essor de ces réseaux, au développement de ces approches scientifiques originales.** Ces sciences, par leur mobilisation des moyens, notamment humains, de la société civile sont une infrastructure significative dans les domaines de l'observation (fourniture de données) et de la scénarisation (y compris la modélisation avec la construction participative) grâce à la mobilisation des compétences hors recherche.



Un regard de parties prenantes

Une consultation a été menée auprès des membres du Conseil d'orientation stratégique (Cos) de la FRB, instance émanant de son Assemblée des parties prenantes, afin de recueillir leur regard sur la recherche scientifique sur la biodiversité en lien avec les enjeux sociétaux. 11 structures, aux activités et visions différentes, se sont exprimées.

1. Les besoins futurs en matière de recherche sur la biodiversité

Le besoin de poursuivre les recherches orientées vers l'exploration de la biodiversité, l'observation et la caractérisation de ses états, fonctionnements et dynamiques est signalé comme un enjeu prioritaire par les membres du Cos. Cela témoigne de la volonté de nombreux acteurs de bien connaître la biodiversité - aussi bien sauvage que domestiquée - pour mieux la protéger. Pour les acteurs, la priorité est alors de documenter les déterminants et les effets des pressions anthropiques ainsi que les rétroactions entre biodiversité et sociétés humaines. **Dans ce cadre, la recherche nécessite d'être ancrée dans des activités concrètes, de dérouler les conséquences de pratiques humaines, tant négatives que positives.**

Conscients que les activités humaines exercent des pressions sur la biodiversité, les acteurs soulignent aussi qu'il est **important de comprendre les processus régissant les interactions entre la biodiversité et les changements globaux**. Les acteurs convergent vers la nécessité de comprendre et d'évaluer les interactions biodiversité-(éco)santé et, dans une moindre mesure, d'approfondir les connaissances sur les relations entre biodiversité et fonctionnements des écosystèmes. Ils appellent ainsi à mieux identifier les biomes les plus négativement impactés par les activités humaines et à quantifier, de façon actuelle et anticipée, les impacts sur la biodiversité mais aussi plus généralement sur la qualité des milieux (eau, air, etc.) et la santé humaine.

En termes d'actions, **le développement et l'évaluation scientifique des solutions fondées sur la nature* apparait également comme un thème de recherche important aux côtés de la gestion des espaces et des espèces pour conserver la biodiversité**. L'intérêt des acteurs porte surtout sur le déploiement de ces solutions dans les socio-écosystèmes anthropisés terrestres et aquatiques (application à des espaces agricoles, industriels, etc.) afin de retrouver des capacités évolutives et adaptatives naturelles. Néanmoins, si ces solutions constituent une piste intéressante pour

accompagner les changements sociétaux, elles ne doivent pas palier la persistance d'activités néfastes aux écosystèmes ni remplacer l'objectif de diminution des pressions anthropiques. Les acteurs plébiscitent également la recherche en conservation visant à l'amélioration de la prise en compte de la biodiversité dans les espaces non protégés, mais interrogent aussi la recherche sur les objectifs, les modalités de mise en œuvre et l'efficacité des actions de conservation (en incluant les connectivités).

A contrario, développer les connaissances nécessaires aux changements transformateurs est un axe très peu plébiscité*, peut-être parce que cette notion est relativement récente (Ipbes, 2019), mal comprise et qu'elle reste encore à transcrire en termes stratégiques et opérationnels clairs. Pour cet axe, les acteurs estiment qu'il est important de définir ce qu'est un "changement transformateur", d'étudier les dynamiques des institutions, les stratégies d'acteurs, les conflits d'usages, mais aussi d'étudier la diversité des valeurs associées aux relations entre humains et non-humains. Ils ciblent des champs de recherche telles que les sciences politiques, l'économie ou encore le droit.

Enfin, le fait de **soutenir des dispositifs et des infrastructures de recherche dédiées à la connaissance de la biodiversité et de sa dynamique face aux pressions**, axe relevant de l'organisation de la recherche, **arrive dans les dernières positions des sujets cruciaux pour les acteurs** qui soulignent toutefois le besoin d'étudier l'efficacité des solutions proposées et mises en œuvre ; de développer l'observation de la biodiversité, la collecte, l'organisation et la mise à disposition des données ; de développer des modèles et scénarios dédiés au pilotage des transitions ; de développer la pluridisciplinarité au sein de la recherche académique. Outre les impacts négatifs évoqués plus haut, les dépendances (notamment économiques) et les interactions positives entre humains et non-humains/écosystèmes nécessitent aussi d'être documentées.



Toutes ces informations doivent fournir des bases pour orienter les acteurs vers des actions plus vertueuses - dont l'efficacité doit être évaluée -, pour accompagner la transformation des dispositifs économiques, sociaux et réglementaires et tendre vers l'atténuation et l'adaptation. De façon spécifique, notons la nécessité de prendre en compte les incidences des politiques publiques sur la biodiversité et sur les eaux de surface et souterraines ainsi que la gestion de l'eau douce en tant que ressource.

2. Les principaux facteurs à prendre en compte dans le futur de la recherche sur la biodiversité

D'une part, les acteurs signalent la **nécessité de prendre en compte, dans les recherches, des facteurs culturels et sociaux**, avec la nécessité d'aller vers un changement de perception et d'interaction entre les humains, les non-humains et les écosystèmes. Il s'agit ici de bio-centrer les regards (y compris des chercheurs) et de traiter les sujets de recherche sous l'angle des anthropo-écosystèmes, avec une logique réellement inter- voire transdisciplinaire. Cela appelle à tenir compte de la pluralité des visions et des valeurs afin de poser les bases d'une cohabitation maintenant la biodiversité (y compris pour sa valeur intrinsèque) aux côtés de services d'approvisionnement (par exemple une production alimentaire de qualité), à fournir des pistes pour développer des politiques inclusives.

D'autre part, ils signalent la **nécessité de prendre en compte, dans les recherches, des facteurs économiques**, avec une économie marchande évoquée comme un puissant facteur négatif - quand il serait, au contraire, nécessaire de mieux faire comprendre et entendre l'importance économique de la biodiversité et les enjeux sociaux de sa conservation.

Les facteurs politiques sont aussi évoqués : il s'agit de lever le verrou de l'inaction politique, de réduire les subventions néfastes à la biodiversité et d'envisager une gouvernance à tous les niveaux territoriaux.

La technologie est, elle, perçue comme un facteur de résolution court-termiste permettant de repousser les problèmes, mais aussi risquant de les aggraver. *In fine*, les acteurs souhaitent s'appuyer sur les recherches et les technologies existantes ainsi que sur des solutions opérationnelles permettant une meilleure résilience des écosystèmes.

Si, lors de la construction de scénarios environnementaux, la gouvernance et l'économie sont les principaux facteurs moteurs, suivis par la société, **la recherche doit permettre d'anticiper les impacts des changements globaux, fournir des outils d'aide à la décision et servir le dialogue entre acteurs et décideurs aux intérêts parfois divergents**.

Glossaire

Approches basées sur les écosystèmes (EN : Ecosystem-based approaches)

Stratégie pour la gestion intégrée des terres, des eaux et des ressources vivantes, qui favorise la conservation et l'utilisation durable d'une manière équitable. Cette approche doit assurer l'équilibre entre les trois objectifs de la Convention pour la Diversité Biologique (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2004).

Autres mesures de conservation efficaces par zone (EN : Other Effective Area-based Conservation Measures)

Une zone géographiquement délimitée, autre qu'une aire protégée, qui est réglementée et gérée de façon à obtenir des résultats positifs et durables à long terme pour la conservation *in situ* de la diversité biologique, y compris des fonctions et services écosystémiques connexes et, le cas échéant, des valeurs culturelles, spirituelles, socio-économiques et d'autres valeurs pertinentes localement (Groupe de travail sur les AMCE de la CMAP-UICN, 2020).

Chaîne globale de valeur (EN : Global value chain)

Ensemble des activités et processus de base et d'appui nécessaires pour produire, délivrer un produit ou un service à travers toutes les phases de son cycle de vie, de la conception à l'utilisation (United Nations Conference on Trade and Development, 2013).

Changements transformateurs (EN : Transformative change)

Réorganisation fondamentale, à l'échelle d'un système, *via* des facteurs technologiques, économiques et sociaux, y compris les paradigmes, les objectifs et les valeurs, visant à la conservation et à l'utilisation durable de la biodiversité, au bien-être humain à long terme et au développement durable (Chan *et al.*, 2020; Palomo *et al.*, 2021).

Diversité bioculturelle (EN : Biocultural diversity)

Cette diversité, son étude procède de la reconnaissance que biodiversité et diversité culturelle sont intimement liées et interconnectées, que les systèmes de pratiques et de connaissances culturelles impactent la biodiversité, et réciproquement, y compris dans sa transformation (Thomas, 2011). L'analyse de cette diversité est une étude des liens entre les humains, leurs sociétés et la diversité biologique.

Gestion adaptative (EN : Adaptive management)

Approche qui met l'accent sur l'apprentissage par la gestion lorsque les connaissances sont incomplètes et que, malgré l'incertitude inhérente, les gestionnaires et les décideurs doivent agir (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Contrairement à une approche traditionnelle par la méthode essai-erreur, la gestion adaptative propose une structure explicite, comprenant l'élucidation minutieuse des objectifs, l'identification de scénarios de gestion alternatifs et des hypothèses de causalité, ainsi que des procédures de collecte de données suivies des phases d'évaluation et de réitération. Le processus est itératif et sert à réduire les incertitudes, à renforcer les connaissances et à améliorer la gestion au fil du temps dans un processus structuré et objectifs-orienté.

Gestion apprenante (EN : Learning management)

Ce concept peut être abordé sous différentes dimensions ce qui explique la multiplicité des définitions : d'organisation / d'entreprise / gestion apprenante... Une gestion qui facilite l'apprentissage pour créer, acquérir et transférer de la connaissance et pour modifier son comportement en fonction de ses nouvelles connaissances et visions (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Intégrité d'un écosystème (EN: Ecosystem integrity)

Un écosystème est généralement considéré comme intègre lorsque ses caractéristiques écologiques dominantes (par exemple, les éléments de la composition, la structure, la fonction et les processus écologiques) se produisent dans leurs plages naturelles de variation et peuvent résister et se rétablir de la plupart des perturbations. La notion concerne les écosystèmes naturels comme anthropisés.

Limites planétaires (EN : Planetary boundaries)

Les limites planétaires définissent un espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé sur des processus biophysiques intrinsèques qui régulent la stabilité du système terrestre et marine à l'échelle de la planète Neuf processus biophysiques qui, ensemble, régulent cette stabilité : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation mondiale de l'eau, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère (Steffen *et al.*, 2015).

Mesure levier (EN : Measure of leverage)

C'est une mesure de préservation de la biodiversité ayant des effets systémiques, aux diverses échelles, locale, régionale et mondiale, se plaçant dans le cadre d'un changement transformateur (Ipbes, 2019 ; Chan *et al.*, 2020 ; Efese, 2023).

Nexus (EN : Nexus)

Inter relations entre les objectifs de développement durable liés à la sécurité alimentaire et hydrique, à la santé pour tous, à la protection de la biodiversité sur terre et dans les océans, et à la lutte contre le changement climatique (C. Carmona-Moreno *et al.*, 2021).

Système adaptatif complexe (EN : Complex adaptive system)

Système constitué d'un réseau dynamique d'interactions, dont le comportement de l'ensemble peut ne pas être prévisible en fonction du comportement des composants. Il est adaptatif en ce sens que les comportements individuels et collectifs mutent et s'auto-organisent en fonction du micro-événement ou de la collection d'événements initiateurs de changement. Trois conditions sont nécessaires : diversité et autonomie des entités composant le système, interactions locales entre ces entités, sélection entre ces ensembles locaux qui ont une capacité d'autoreproduction (Miller and Page, 2009).

Sciences de la durabilité (EN : Sustainability science)

Les sciences de la durabilité désignent les études des relations dynamiques entre les humains et leurs environnements, en mettant particulièrement l'accent sur la vulnérabilité, la robustesse, la résilience et la stabilité des systèmes couplés humains-environnements (Wu *et al.*, 2014)

Solutions fondées sur la nature (EN: Nature-based Solutions)

Adopté par l'UNEA-5 (UNEA, 2022), ce sont les actions visant à protéger, gérer et restaurer de manière durable les écosystèmes naturels et modifiés de manière à relever les défis sociétaux de manière efficace et adaptative, afin d'apporter à la fois des avantages pour le bien-être humain et la biodiversité (Ipbes, 2019 ; Cohen-Shacham *et al.*, 2016).

Télécouplage (EN : Telecoupling)

Impacts socio-économiques et environnementaux des interactions lointaines et couplées entre les humains, les sociétés et les écosystèmes (Ipbes, 2019).



Références bibliographiques du glossaire

C. Carmona-Moreno, E., Crestaz, Y., Cimmarrusti, F., Farinosi, M., Biedler, A., Amani, A., Mishra, Carmona-Gutierrez, 2021. Implementing the Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus and achieving the Sustainable Development Goals. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.

Chan, K.M.A., Boyd, D.R., Gould, R.K., Jetzkowitz, J., Liu, J., Muraca, B., Naidoo, R., Olmsted, P., Satterfield, T., Selomane, O., Singh, G.G., Sumaila, R., Ngo, H.T., Boedhihartono, A.K., Agard, J., de Aguiar, A.P.D., Armenteras, D., Balint, L., Barrington-Leigh, C., Cheung, W.W.L., Díaz, S., Driscoll, J., Esler, K., Eyster, H., Gregr, E.J., Hashimoto, S., Hernández Pedraza, G.C., Hickler, T., Kok, M., Lazarova, T., Mohamed, A.A.A., Murray-Hudson, M., O'Farrell, P., Palomo, I., Saysel, A.K., Seppelt, R., Settele, J., Strassburg, B., Xue, D., Brondizio, E.S., 2020. Levers and leverage points for pathways to sustainability. *People Nat.* 2, 693–717. <https://doi.org/10.1002/pan3.10124>

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., Maginnis, S., 2016. Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN, Gland, Switzerland.

Dorren, L.K.A., Berger, F., Imeson, A.C., Maier, B., Rey, F., 2004. Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. *For. Ecol. Manag.* 195, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.057>

Efese, 2023. L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques [WWW Document]. Ministères Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques> (accessed 3.7.23).

Groupe de travail sur les AMCE de la CMAP-UICN, 2020. Reconnaissance et signalement des autres mesures de conservation efficaces par zone. UICN, Gland, Suisse. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.PATRS.3.fr>

C. Carmona-Moreno, E., Crestaz, Y., Cimmarrusti, F., Farinosi, M., Biedler, A., Amani, A., Mishra, Carmona-Gutierrez, 2021. Implementing the Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus and achieving the Sustainable Development Goals. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.

Chan, K.M.A., Boyd, D.R., Gould, R.K., Jetzkowitz, J., Liu, J., Muraca, B., Naidoo, R., Olmsted, P., Satterfield, T., Selomane, O., Singh, G.G., Sumaila, R., Ngo, H.T., Boedhihartono, A.K., Agard, J., de Aguiar, A.P.D., Armenteras, D., Balint, L., Barrington-Leigh, C., Cheung, W.W.L., Díaz, S., Driscoll, J., Esler, K., Eyster, H., Gregr, E.J., Hashimoto, S., Hernández Pedraza, G.C., Hickler, T., Kok, M., Lazarova, T., Mohamed, A.A.A., Murray-Hudson, M., O'Farrell, P., Palomo, I., Saysel, A.K., Seppelt, R., Settele, J., Strassburg, B., Xue, D., Brondizio, E.S., 2020. Levers and leverage points for pathways to sustainability. *People Nat.* 2, 693–717. <https://doi.org/10.1002/pan3.10124>

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., Maginnis, S., 2016. Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN, Gland, Switzerland.

Groupe de travail composition non limitée sur le cadre mondial de la biodiversité pour l'après-2020. Convention sur la diversité biologique, 25 novembre 2022. Glossaire actualisé du projet de ce cadre mondial de la biodiversité de l'après-2020. CBD/WG2020/5/4. <https://www.cbd.int/doc/c/e999/4bbe/d981f88c804a1c54f6fc51c8/wg2020-05-04-fr.pdf>

Efese, 2023. L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques [WWW Document]. Ministères Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques> (accessed 3.7.23).

Groupe de travail sur les AMCE de la CMAP-UICN, 2020. Reconnaissance et signalement des autres mesures de conservation efficaces par zone. UICN, Gland, Suisse. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.PATRS.3.fr>

IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). Zenodo, IPBES secretariat, Bonn, Germany.

Millennium Ecosystem Assessment (Ed.), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.

Miller, J.H., Page, S., 2009. Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life, Complex Adaptive Systems. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400835522>

Palomo, I., Locatelli, B., Otero, I., Colloff, M., Crouzat, E., Cuni-Sanchez, A., Gómez-Baggethun, E., González-García, A., Grêt-Regamey, A., Jiménez-Aceituno, A., Martín-López, B., Pascual, U., Zafra-Calvo, N., Bruley, E., Fischborn, M., Metz, R., Lavorel, S., 2021. Assessing nature-based solutions for transformative change. *One Earth* 4, 730–741. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.013>

Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2004. Approche Par Écosystème, Lignes Directrices De La CDB. ed. Montréal: Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Thomas, F., 2011. Cosmologies, diversité bioculturelle et préservation de l'environnement. *Nat. Sci. Sociétés* 19, 129–132.

UNEA, 2022. Proceedings, Report, Ministerial Declaration, Resolutions and Decisions UNEA 5.2 [WWW Document]. Environ. Assem. URL <http://www.unep.org/environment-assembly/unea-5.2/proceedings-report-ministerial-declaration-resolutions-and-decisions-unea-5.2> (accessed 3.8.23).

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2013. CHAPTER IV Global Value Chains: Investment and Trade for Development. Switzerland.

Wu, J.-G., Guo, X.-C., Yang, J., Qian, G.-X., Niu, J.-M., Liang, C.-Z., Zhang, Q., Li, A., 2014. [What is sustainability science?]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao J. Appl. Ecol.* 25, 1–11.

Références bibliographiques des focus

Focus 1 :

Junker, J., Beja, P., Brotons, L., Fernandez, M., Fernández, N., Kissling, W.D., Lumbierres, M., Solheim, A.L., Maes, J., Morán-Ordóñez, A., Moreira, F., Musche, M., Santana, J., Valdez, J., Pereira, H., 2023. D4.1. List and specifications of EBVs and EESVs for a European wide biodiversity observation network. ARPHA Preprints 4, e102530. <https://doi.org/10.3897/arphapreprints.e102530>

Kissling, W.D., Lumbierres, M., 2023. Essential Biodiversity Variable workflows: designing the freshwater, marine and terrestrial EBV workflows from data collection to modeling. ARPHA Preprints 4, e101949. <https://doi.org/10.3897/arphapreprints.e101949>

Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., Bruford, M.W., Brummitt, N., Butchart, S.H.M., Cardoso, A.C., Coops, N.C., Dulloo, E., Faith, D.P., Freyhof, J., Gregory, R.D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., Karp, D.S., McGeoch, M.A., Obura, D., Onoda, Y., Petto-relli, N., Reyers, B., Sayre, R., Scharlemann, J.P.W., Stuart, S.N., Turak, E., Walpole, M., Wegmann, M., 2013. Essential Biodiversity Variables. *Science* 339, 277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>

Schmeller, D.S., Weatherdon, L.V., Loyau, A., Bondeau, A., Brotons, L., Brummitt, N., Geijzendorffer, I.R., Haase, P., Kuemmerlen, M., Martin, C.S., Mihoub, J.-B., Rocchini, D., Saarenmaa, H., Stoll, S., Regan, E.C., 2018. A suite of essential biodiversity variables for detecting critical biodiversity change. *Biological Reviews* 93, 55–71. <https://doi.org/10.1111/brv.12332>

Focus 2 :

Calderón-Sanou, I., Münkemüller, T., Zinger, L., Schimann, H., Yoccoz, N.G., Gielly, L., Foulquier, A., Hedde, M., Ohlmann, M., Roy, M., Si-Moussi, S., Thuiller, W., 2021. Cascading effects of moth outbreaks on subarctic soil food webs. *Sci Rep* 11, 15054. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94227-z>

Ibarbalz, F.M., Henry, N., Brandão, M.C., Martini, S., Busseni, G., Byrne, H., Coelho, L.P., Endo, H., Gasol, J.M., Gregory, A.C., Mahé, F., Rigonato, J., Royo-Llonch, M., Salazar, G., Sanz-Sáez, I., Scalco, E., Soviadan, D., Zayed, A.A., Zingone, A., Labadie, K., Ferland, J., Marec, C., Kandels, S., Picheral, M., Dimier, C., Poulain, J., Pisarev, S., Carmichael, M., Pesant, S., Babin, M., Boss, E., Iudicone, D., Jaillon, O., Acinas, S.G., Ogata, H., Pelletier, E., Stemann, L., Sullivan, M.B., Sunagawa, S., Bopp, L., de Vargas, C., Karp-Boss, L., Wincker, P., Lombard, F., Bowler, C., Zinger, L., 2019. Global Trends in Marine Plankton Diversity across Kingdoms of Life. *Cell* 179, 1084–1097.e21. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.10.008>

Karimi, B., Terrat, S., Dequiedt, S., Saby, N.P.A., Horrigue, W., Lelièvre, M., Nowak, V., Jolivet, C., Arrouays, D., Winker, P., Cruaud, C., Bispo, A., Maron, P.-A., Bouré, N.C.P., Ran-jard, L., 2018. Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Science Advances* 4, eaat1808. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1808>

Nunan, N., Schmidt, H., Raynaud, X., 2020. The ecology of heterogeneity: soil bacterial communities and C dynamics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 375, 20190249. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0249>

Focus 3 :

Gilmore, R., 1993. Catastrophe theory for scientists and engineers / Robert Gilmore,... Dover publications, New York.

Kéfi, S., Guttal, V., Brock, W.A., Carpenter, S.R., Ellison, A.M., Livina, V.N., Seekell, D.A., Scheffer, M., Nes, E.H. van, Dakos, V., 2014. Early Warning Signals of Ecological Transitions: Methods for Spatial Patterns. *PLOS ONE* 9, e92097. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092097>

Newton, A.C. (Ed.), 2021. Ecosystem Collapse and Recovery, in: *Ecosystem Collapse and Recovery, Ecology, Biodiversity and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. i–i.
Petraitis, P., 2013. *Multiple Stable States in Natural Ecosystems*. Oxford University Press, Oxford, New York.

Scheffer, M., 2011. Critical Transitions in Nature and Society. *The American Journal of Psychology* 124, 365–367. <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.124.3.0365>

Thom, R., 1974. *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Inter Editions, Paris.

Focus 4 :

Chapin III, F.S., Randerson, J.T., McGuire, A.D., Foley, J.A., Field, C.B., 2008. Changing feedbacks in the climate–biosphere system. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6, 313–320. <https://doi.org/10.1890/080005>
del Río, M., Pretzsch, H., Ruíz-Peinado, R., Ampoorter, E., Annighöfer, P., Barbeito, I., Bielak, K., Brazaitis, G., Coll, L., Drössler, L., Fabrika, M., Forrester, D.I., Heym, M., Hurt, V., Kurylyak, V., Löf, M., Lombardi, F., Madrickiene, E., Matović, B., Mohren, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schütze, G., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanović, D., Svoboda, M., Zlatanov, T.M., Bravo-Oviedo, A., 2017. Species interactions increase the temporal stability of community productivity in *Pinus sylvestris*–*Fagus sylvatica* mixtures across Europe. *Journal of Ecology* 105, 1032–1043. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12727>

FAO and UNEP, 2020. *The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people*. Rome, Italy.

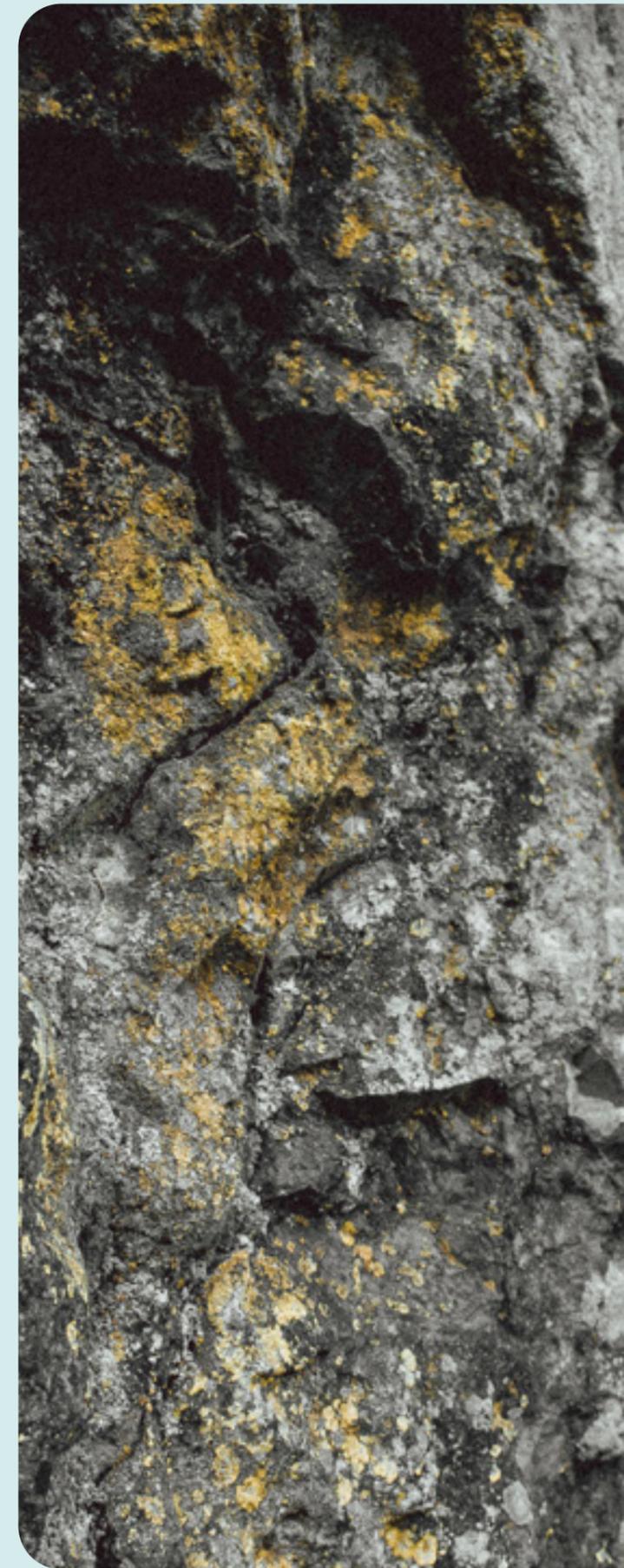
Grossiord, C., Granier, A., Ratcliffe, S., Bouriaud, O., Bruehlheide, H., Češko, E., Forrester, D.I., Dawud, S.M., Finér, L., Pollastrini, M., Scherer-Lorenzen, M., Valladares, F., Bonal, D., Gessler, A., 2014. Tree diversity does not always improve resistance of forest ecosystems to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 14812–14815. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411970111>

IGN, 2021. *Résultats 2021 de l'Inventaire forestier national : une croissance forestière sous surveillance*.

Jactel, H., Moreira, X., Castagnérol, B., 2021. Tree Diversity and Forest Resistance to Insect Pests: Patterns, Mechanisms, and Prospects. *Annual Review of Entomology* 66, 277–296. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041720-075234>

Jourdan, M., Kunstler, G., Morin, X., 2020. How neighbourhood interactions control the temporal stability and resilience to drought of trees in mountain forests. *Journal of Ecology* 108, 666–677. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13294>

Li, Y., Du, Y.-B., Chen, J.-T., Wang, M.-Q., Guo, S.-K., Schuldt, A., Luo, A., Guo, P.-F., Mi, X.-C., Liu, X.-J., Ma, K.-P., Bruehlheide, H., Chesters, D., Liu, X., Zhu, C.-D., 2023. Tree dissimilarity determines multi-dimensional beta-diversity of herbivores and carnivores via bottom-up effects. *Journal of Animal Ecology* 92, 442–453. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13868>



Références bibliographiques des focus

Liang, J., Crowther, T.W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A.D., Bozzato, F., Pretzsch, H., de-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C.B., Glick, H.B., Hengeveld, G.M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., Viana, H., Vibrans, A.C., Ammer, C., Schall, P., Verbyla, D., Tchebakova, N., Fischer, M., Watson, J.V., Chen, H.Y.H., Lei, X., Schelhaas, M.-J., Lu, H., Gianelle, D., Parfenova, E.I., Salas, C., Lee, E., Lee, B., Kim, H.S., Bruelheide, H., Coomes, D.A., Piotta, D., Sunderland, T., Schmid, B., Gourlet-Fleury, S., Sonké, B., Tavani, R., Zhu, J., Brandl, S., Vayreda, J., Kitahara, F., Searle, E.B., Neldner, V.J., Ngugi, M.R., Baraloto, C., Frizzera, L., Bałazy, R., Oleksyn, J., Zawila-Niedzwiecki, T., Bouriaud, O., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Valladares, F., Jagodzinski, A.M., Peri, P.L., Gonmadje, C., Marthy, W., O'Brien, T., Martin, E.H., Marshall, A.R., Rovero, F., Bitariho, R., Niklaus, P.A., Alvarez-Loayza, P., Chamuya, N., Valencia, R., Mortier, F., Wortel, V., Engone-Obiang, N.L., Ferreira, L.V., Odeke, D.E., Vasquez, R.M., Lewis, S.L., Reich, P.B., 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354, aaf8957. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8957>

Morin, X., Fahse, L., Scherer-Lorenzen, M., Bugmann, H., 2011. Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters* 14, 1211–1219. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01691.x>

Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Toigo, M., Vallet, P., Perot, T., Bontemps, J.-D., Piedallu, C., Courbaud, B., 2015. Overyielding in mixed forests decreases with site productivity. *Journal of Ecology* 103, 502–512. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12353>

Zhang, S., Landuyt, D., Verheyen, K., De Frenne, P., 2022. Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations. *Journal of Applied Ecology* 59, 1428–1439. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14158>

Focus 5 :

INRAE, 2022. ECOTOX : le réseau d'écotoxicologie terrestre et aquatique - Fiche thématique N°42 [WWW Document]. URL <https://www6.inrae.fr/ecotox/Productions/Fiches-thematiques/Fiche-thematique-N-42-decembre-2022>

National Science Foundation - LTER Network - Long term ecological research [WWW Document], n.d. . LTER. URL <https://lternet.edu/>

Persson, L., Carney Almroth, B.M., Collins, C.D., Cornell, S., de Wit, C.A., Diamond, M.L., Fantke, P., Hasselöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M.W., Søgaard Jørgensen, P., Villarubia-Gómez, P., Wang, Z., Hauschild, M.Z., 2022. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ. Sci. Technol.* 56, 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>

Regine, 2022. ESCo: Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Creseb Bretagne. Sophie Leenhardt (coord.), Laure Mamy (coord.), Stéphane Pesce (coord.), Wilfried Sanchez (coord.), Anne-Laure Achard, Marcel Amichot, Joan Artigas, Stéphanie Aviron, Carole Barthélémy, Rémy Beaudoin, Carole Bedos, Annette Bérard, Philippe Berny, Cédric Bertrand, Colette Bertrand, Stéphane Betouille, Eve Bureau-Point, Sandrine Charles, Arnaud Chaumot, Bruno Chauvel, Michael Coeurdassier, Marie-France Corio-Costet, Marie-Agnès Coutellec, Olivier Crouzet, Isabelle Doussan, Juliette Faburé, Clémentine Fritsch, Nicola Gallai, Patrice Gonzalez, Véronique Gouy, Mickael Hedde, Alexandra Langlais, Fabrice Le Bellec, Christophe Leboulanger, Morgane Le Gall, Sophie Le Perchec, Christelle Margoum, Fabrice Martin-Laurent, Rémi Mongruel, Soizic Morin, Christian Mougin, Dominique Munaron, Sylvie Néliu, Céline Pelosi, Magali Rault, Sergi Sabater, Sabine Stachowski-Haberkorn, Elliott Sucre, Marielle Thomas, Julien Tournebize

Focus 6 :

Berthet, E.T., Bretagnolle, V., Gaba, S., 2022. Place-based social-ecological research is crucial for designing collective management of ecosystem services. *Ecosystem Services* 55, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101426>
Bretagnolle, V., Berthet, E., Gross, N., Gauffre, B., Plumejeaud, C., Houte, S., Badenhauer, I., Monceau, K., Allier, F., Monestiez, P., Gaba, S., 2018. Towards sustainable and multifunctional agriculture in farmland landscapes: Lessons from the integrative approach of a French LTSER platform. *Science of The Total Environment* 627, 822–834. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.142>

Catarino, R., Bretagnolle, V., Perrot, T., Vialloux, F., Gaba, S., 2019. Bee pollination outperforms pesticides for oilseed crop production and profitability. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 286, 20191550. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1550>

Gaba, S., Bretagnolle, V., 2020. Social-ecological experiments to foster agroecological transition. *People and Nature* 2, 317–327. <https://doi.org/10.1002/pan3.10078>

Perrot, T., Rusch, A., Coux, C., Gaba, S., Bretagnolle, V., 2021. Proportion of Grassland at Landscape Scale Drives Natural Pest Control Services in Agricultural Landscapes. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9.

Focus 7 :

Peyre, M., Vourc'h, G., Lefrançois, T., Martin-Prevel, Y., Sousana, J.-F., Roche, B., 2021. PREZODE: preventing zoonotic disease emergence. *The Lancet* 397, 792–793. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00265-8)

Roche, B., Garchitorena, A., Guégan, J.-F., Arnal, A., Roiz, D., Morand, S., Zambrana-Torrel, C., Suzán, G., Daszak, P., 2020. Was the COVID-19 pandemic avoidable? A call for a "solution-oriented" approach in pathogen evolutionary ecology to prevent future outbreaks. *Ecology Letters* 23, 1557–1560. <https://doi.org/10.1111/ele.13586>

Focus 8 :

Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D.I., Gardiner, B., González-Olabarria, J.R., Lyver, P.O., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I.D., van der Plas, F., Jactel, H., 2017. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodivers Conserv* 26, 3005–3035. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>

FAO and UNEP, 2020. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome, Italy.

Muys, B., Angelstam, P., Bauhus, J., Bouriaud, L., Jactel, H., Kraigher, H., Müller, J., Pettorelli, N., Pötzelsberger, E., Primmer, E., Svoboda, M., Thorsen, J.B., Van Meerbeek, K., 2022. Forest Biodiversity in Europe, From Science to Policy 13. ed. European Forest Institute.

Focus 9 :

Claudet, J., Loiseau, C., Sostres, M., Zupan, M., 2020. Under-protected Marine Protected Areas in a Global Biodiversity Hotspot. *One Earth* 2, 380–384. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.03.008>

Di Lorenzo, M., Guidetti, P., Di Franco, A., Calò, A., Claudet, J., 2020. Assessing spillover from marine protected areas and its drivers: A meta-analytical approach. *Fish and Fisheries* 21, 906–915. <https://doi.org/10.1111/faf.12469>

Gorod-Colvert, K., Sullivan-Stack, J., Roberts, C., Constant, V., Horta e Costa, B., Pike, E.P., Kingston, N., Laffoley, D., Sala, E., Claudet, J., Friedlander, A.M., Gill, D.A., Lester, S.E., Day, J.C., Gonçalves, E.J., Ahmadi, G.N., Rand, M., Villagomez, A., Ban, N.C., Gurney, G.G., Spalding, A.K., Bennett, N.J., Briggs, J., Morgan, L.E., Moffitt, R., Deguignet, M., Pickett, E.K., Darling, E.S., Jessen, S., Hameed, S.O., Di Carlo, G., Guidetti, P., Harris, J.M., Torre, J., Kizilkaya, Z., Agardy, T., Cury, P., Shah, N.J., Sack, K., Cao, L., Fernandez, M., Lubchenco, J., 2021. The MPA Guide: A framework to achieve global goals for the ocean. *Science* 373, eabf0861. <https://doi.org/10.1126/science.abf0861>

Gurney, G.G., Adams, V.M., Álvarez-Romero, J.G., Claudet, J., 2023. Area-based conservation : Taking stock and looking ahead. *One Earth* 6, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.01.012>

Jacquemont, J., Blasiak, R., Le Cam, C., Le Gouvellec, M., Claudet, J., 2022. Ocean conservation boosts climate change mitigation and adaptation. *One Earth* 5, 1126–1138. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.09.002>

Focus 10 :

Comte, A., Kervinio, Y., Levrel, H., 2020. Ecosystem accounting in support of the transition to sustainable societies – the case for a parsimonious and inclusive measurement of ecosystem condition. CIRED Working Paper.

Feger, C., Levrel, H., Rambaud, A., 2022. Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au cœur de la chose publique. *Revue française d'administration publique* 183, 815–829. <https://doi.org/10.3917/rfap.183.0174>

Feger, C., Mermet, L., 2017. A blueprint towards accounting for the management of ecosystems. *Accounting, Auditing & Accountability Journal* 30, 1511–1536. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-12-2015-2360>

Rambaud, A., Richard, J., 2015. The "Triple Depreciation Line" instead of the "Triple Bottom Line": Towards a genuine integrated reporting. *Critical Perspectives on Accounting* 33, 92–116. <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2015.01.012>

Focus 11 :

Lovering, J., Swain, M., Blomqvist, L., Hernandez, R.R., 2022. Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. *PLOS ONE* 17, e0270155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270155>

Wu, G.C., Jones, R.A., Leslie, E., Williams, J.H., Pascale, A., Brand, E., Parker, S.S., Cohen, B.S., Fargione, J.E., Souder, J., Batres, M., Gleason, M.G., Schindel, M.H., Stanley, C.K., 2023. Minimizing habitat conflicts in meeting net-zero energy targets in the western United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120, e2204098120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2204098120>

Crédits photographiques

© Anne Nygard, Annie Spratt, Coralie Meurice, Emilie Cotterill, Guillaume Bergaglia, Harry Grout, James Wainscoat, Lionel Gustave, Mariagrazia Viezzer, Olli Kilpi, Rui Silvestre, Sylwia Bartyzel, CHUTTERSAP, Luca J, This is Engineering, trail, Waren Brasse, Pexels

Directrice de la publication : Denis Couvet et Hélène Soubelet

Rédacteurs et contributeurs : voir p. 3

Graphisme : François Junot

Mise en page : Sidonie Joubert

© FRB 2023

ISBN print : 979-10-91015-65-3 - ISBN pdf : 979-10-91015-66-0

Entre 2021 et 2022, le groupe Enjeux transversaux biodiversité (GET biodiversité) de l'Alliance nationale de recherche pour l'Environnement (AllEnvi) a travaillé à une prospective pour la recherche française sur la biodiversité. Depuis les derniers travaux publiés par la FRB en 2012, le paysage de la recherche sur la biodiversité a fortement évolué et une actualisation des projections et perspectives s'avérait nécessaire.

Dans ce cadre, la Fondation pour la recherche sur la biodiversité a animé les discussions et coordonné la rédaction d'un document rassemblant membres des Conseils scientifiques de la FRB entre 2021 et 2023, experts du GET d'AllEnvi et collaborateurs externes. Le présent document constitue un travail d'identification, d'analyse et de catégorisation des différents axes de recherche en biodiversité sans pour autant en former une liste exhaustive et impartiale.

Fondation de coopération scientifique, la Fondation pour la recherche sur la biodiversité a pour mission de favoriser les activités de recherche sur la biodiversité en lien avec les acteurs de la société. Susciter l'innovation, développer et soutenir des projets, diffuser les connaissances et mobiliser l'expertise sont au cœur de ses actions.

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)
195, rue Saint-Jacques 75005 Paris
www.fondationbiodiversite.fr
@FRBiodiv



Membres Fondateurs de la FRB

