



HAL
open science

Prospective scientifique pour la recherche française sur la biodiversité

Martine Antona, Raphaël Arlettaz, Bernard Bodo, Jean-Pierre Boude, Pierre Boudry, Thierry Bourgoïn, Catherine Boyen, Marie-Christine Cormier-Salem, Franck Courchamp, Denis Couvet, et al.

► To cite this version:

Martine Antona, Raphaël Arlettaz, Bernard Bodo, Jean-Pierre Boude, Pierre Boudry, et al.. Prospective scientifique pour la recherche française sur la biodiversité. Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité. 2015. hal-04216374

HAL Id: hal-04216374

<https://hal.inrae.fr/hal-04216374v1>

Submitted on 30 Aug 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE POUR LA
RECHERCHE FRANÇAISE
SUR LA

biodiversité

2015



RÉDACTEURS ET CONTRIBUTEURS DE LA PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE 2015

La rédaction et l'édition de ce document de prospective scientifique ont été coordonnées par Jean-François Silvain, président du conseil scientifique de 2009 à 2013 et Flora Pelegrin, responsable du pôle stratégie et animation scientifique à la FRB.

Cette prospective a été préparée et discutée collectivement par les membres du conseil scientifique de la FRB 2009–2013, dont la composition était la suivante :

Martine Antona - CIRAD

Raphaël Arlettaz - Institut pour l'écologie et l'évolution, Université de Berne, Suisse

Bernard Bodo - MNHN

Jean-Pierre Boude - ENSAR

Pierre Boudry - IFREMER

Thierry Bourgoïn - MNHN

Catherine Boyen - CNRS

Marie-Christine Cormier-Salem - IRD

Franck Courchamp - CNRS

Denis Couvet - MNHN

Isabelle Doussan - INRA

Jean-Christophe Glaszmann - CIRAD

Sandra Lavorel - CNRS

Paul Leadley - Université Paris XI

François Lefèvre - INRA

Wouter Los - Université Amsterdam, Pays-Bas

Francis Martin - INRA

Serge Morand - CNRS

Jean-François Silvain - IRD

Etienne Verrier - AgroParisTech

Les coordinateurs et rédacteurs principaux de chaque chapitre, ainsi que les contributeurs, sont indiqués en tête des différentes parties.

L'axe « réponses et adaptation » de cette prospective est issu du travail réalisé dans le cadre d'un groupe de travail animé par Ophélie Ronce (CNRS, ISEM), avec l'appui de François Lefèvre (du conseil scientifique).

Les contributions des membres du conseil d'orientation stratégique lors de groupes de travail organisés au premier semestre 2013 ont été intégrées au texte par les rédacteurs de chaque axe. Les participants aux groupes de travail sont listés en annexe à ce document

PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE POUR LA
RECHERCHE FRANÇAISE
SUR LA
biodiversité
2015



Longtemps limitée au monde des sciences naturelles essentiellement descriptives, la diversité biologique est passée en quelques décennies du statut de thématique scientifique à celui de problématique sociétale majeure.

Rappelons que c'est grâce aux travaux de recherche de scientifiques remarquables que le monde a pu prendre conscience de l'érosion manifeste de la diversité biologique et de la dégradation des services écosystémiques. Cette prise de conscience a été « aidée » par la diminution drastique du nombre d'individus de grandes espèces emblématiques. Il a été démontré par ailleurs, que cette érosion de la biodiversité était liée à une utilisation irraisonnée des ressources naturelles par l'Homme et à un non-respect (liée le plus souvent à une non-connaissance) des écosystèmes et des services écosystémiques qu'ils concèdent. La biodiversité et les écosystèmes constituent en effet le premier maillon des chaînes de valeur dont dépend le fonctionnement de nos sociétés. Les bénéfices socio-économiques, directs et indirects, sont devenus un enjeu qui dépasse la Convention sur la Diversité Biologique. La biodiversité est ainsi inscrite dans les agendas internationaux, au même titre que la lutte contre le changement climatique.

La plateforme internationale IPBES (*Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services*) au sein de laquelle la communauté scientifique française est impliquée, donne à l'instar du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), la légitimité scientifique indispensable à la prise en compte de cette nouvelle donne par les politiques publiques.

Depuis de nombreuses années, le programme international Diversitas, soutenu par l'ICSU (*International Council of Scientific Unions*) a permis d'aborder cette thématique de recherche au niveau international. Aujourd'hui rassemblé avec les programmes sur : i) le changement climatique (WCRP, *World Climate Research Program*), ii) les interactions Géosphère-Biosphère (*International Geosphere Biosphere Program*) et iii) la dimension sociétale (*International Human Dimension Program*) au sein du grand programme Future Earth, la biodiversité est abordée de manière plus systémique. Citons également l'action internationale GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*), initiative majeure à laquelle participe la France, qui permet l'accès libre et gratuit aux données de la biodiversité.

En Europe, des actions de recherche structurantes ont pris corps au cours du dernier programme cadre notamment grâce aux actions du réseau européen « Eranet BiodivERSA ». La communauté scientifique ainsi rassemblée souhaite aujourd'hui mettre en place une Initiative européenne de Programmation Conjointe dédiée. Là encore, les équipes françaises sont au premier rang.

L'année 2015 est une grande année pour la recherche sur la Biodiversité en France. Au-delà de la COP21 qui se tient à Paris en fin d'année, et qui abordera à l'évidence la problématique de la biodiversité et des services écosystémiques, d'autres initiatives ont vu le jour.

La Stratégie Nationale de Recherche (SNR) a été publiée en début d'année par le Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Cet exercice mené en interministériel a pour objectif de dresser une vision stratégique de la recherche française à cinq ans en mettant en exergue les orientations prioritaires qui seront la trame i) de la programmation nationale de l'ANR et des autres agences, ii) des grands plans nationaux, iii) d'actions prioritaires de recherche et d'innovation soutenues par le Programme Investissements d'Avenir et iv) de la construction de l'Espace Européen de la Recherche.

En effet pour répondre aux questions posées par le citoyen et le politique, il faut parallèlement au suivi de la biodiversité, de la mise en place de normes et de lois, développer une recherche rigoureuse, exigeante et novatrice dans ce domaine.¹

L'étude de la dynamique et de la résilience de la biodiversité dans un contexte de changements environnementaux rapides fait partie des orientations prioritaires de la SNR. Ces recherches se conçoivent de l'échelle du gène à celle de l'écosystème. Comme pour le climat, les modèles doivent intégrer des problématiques particulièrement complexes comme celle des interactions et rétroactions, celle des sauts d'échelle (du global au régional), des non linéarités (phénomènes de résilience, de défense, d'adaptation...). On sait en effet aujourd'hui qu'au sein du Système Terre, le Vivant interagit avec la Terre solide et fluide, mais également de manière très prégnante, avec les sociétés humaines.

Parallèlement, dans le cadre de la révision de la feuille de route nationale des infrastructures de recherche, une réflexion en cours portée par l'Alliance AllEnvi, qui regroupe les établissements de recherche impliqués dans les Sciences de l'Environnement, concerne la mise en réseau des observatoires de recherche pour l'étude de la dynamique de la biodiversité. Ces observatoires de recherche doivent pouvoir échanger et communiquer avec d'autres infrastructures de recherche que sont les collections de spécimens ou les banques de ressources génétiques. Ils doivent pouvoir communiquer au travers de leurs bases de données, de leurs standards et de leurs protocoles avec l'Inventaire National du Patrimoine Naturel ainsi qu'avec les observatoires déployés pour le suivi de la biodiversité au niveau national comme régional, comme par exemple, l'Observatoire National de la Biodiversité ou le Système d'Information sur la Nature et les Paysages. Un grand travail est devant nous.

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité mène pour la deuxième fois un exercice de prospective scientifique sur la recherche française en Biodiversité, avec l'ensemble des acteurs. Cet exercice est un exemple de réussite de co-construction des questions de recherche, stimulée par l'ensemble des parties prenantes intéressées par le devenir de la biodiversité. Ce document, par ailleurs de haute qualité scientifique, en est le témoignage.



Elisabeth Vergès
Directrice scientifique du secteur «*Environnement-Univers*»
Direction générale de la recherche et de l'innovation
Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement
supérieur et de la Recherche

¹ Extrait de la SNR, atelier du défi 1, version longue : « Les discours sur la biodiversité jouent souvent sur l'émotion et font oublier que les systèmes vivants évoluent spontanément par l'effet combiné des hasards de leur reproduction, de leurs contraintes physiologiques propres et des pressions de sélection exercées par leur environnement sur les générations successives. L'Évolution est la résultante de la création de la diversité par les phénomènes de mutation des génomes à différentes échelles et de la sélection exercée par les pressions environnementales sur les organismes. Elle est donc synonyme de diversité biologique. Prendre en compte les capacités évolutives des populations est donc primordial pour appréhender les systèmes vivants, leurs adaptations au changement climatique et à l'anthropisation des milieux, leur préservation et le contrôle de quelques-uns d'entre eux. »



SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
TABLEAU DES PRIORITÉS DE RECHERCHE	15
AXE 1 : VALEURS ET ACTEURS	18
AXE 2 : FONCTIONS ET SERVICES	22
AXE 3 : PRESSIONS ET RISQUES	27
AXE 4 : RÉPONSES ET FLEXIBILITÉS	32
AXE TRANSVERSAL : SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE CONNAISSANCES	41
SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES : TERRITOIRES, INNOVATION ET ACTIONS	48
BIBLIOGRAPHIE	53
ANNEXE : LISTE DES CONTRIBUTEURS	56



INTRODUCTION

Le conseil scientifique (CS) de la FRB a lancé en 2012 un bilan de son action et une actualisation de la prospective publiée en 2009, en développant un regard critique sur l'incidence et l'actualité de cette prospective et en soulignant l'avancée des fronts de science. Le premier semestre 2013 a été consacré à un dialogue entre le conseil d'orientation stratégique (COS) et le conseil scientifique au sein de groupes de travail, afin d'intégrer le point de vue et la contribution des porteurs d'enjeux de la biodiversité. Le travail de prospective a été achevé début 2015 après une phase de relecture des textes produits.

D'UNE PROSPECTIVE À L'AUTRE

Entre le début 2009 et la fin de l'année 2014, ce sont plusieurs milliers d'articles scientifiques traitant de questions relatives à la biodiversité qui ont été publiés tant dans les grandes revues internationales généralistes que dans des revues plus spécialisées. Parmi ces articles, on note de nombreux travaux de synthèse ayant mobilisé d'importants consortiums de chercheurs, ainsi que des exercices dits « d'horizon scanning » (analyse prospective), qui visent à identifier les facteurs encore peu reconnus qui peuvent impacter la conservation de la diversité biologique (Sutherland *et al.*, 2014). Parallèlement, plusieurs documents d'importance majeure ont été publiés, comme les troisième (2010) et quatrième (2014) éditions des Perspectives mondiales de la diversité biologique (Global Biodiversity Outlook) de la convention sur la diversité biologique (CDB), le cahier technique de la CDB n°50 sur les scénarios de biodiversité (2010), qui a contribué à faire connaître auprès des décideurs le concept de « point de basculement » ou encore le cahier technique n°75 sur l'impact de l'acidification des océans sur la biodiversité marine (2014).

Les connaissances scientifiques sur la biodiversité ont donc significativement progressé pendant les six dernières années, en tirant avantage à la fois de l'évolution des techniques d'investigation (du développement de la génomique environnementale aux progrès de l'observation satellitaire), des méthodes d'analyse des données et du développement de la modélisation pour les approches écologiques et évolutives, et de la mobilisation croissante des sciences humaines et sociales pour les études anthropologiques, sociologiques ou économiques nécessaires à une meilleure prise en compte du facteur humain dans l'étude des multiples questions relatives au devenir de la biodiversité. Des approches qui semblaient impossibles ou difficilement

réalisables, à la fin des années 2000 sont aujourd'hui devenues presque routinières. Aux contraintes liées à l'accès à la donnée s'ajoutent, voire se substituent, des contraintes et des besoins d'expertises liées au traitement de volumes massifs de données, ce qui a conduit à des changements majeurs et rapides dans le fonctionnement des laboratoires de recherche. Parallèlement à l'évolution des moyens techniques d'investigation, et dans la logique de l'accroissement du volume de données disponibles, on a vu se multiplier d'abord dans le champ des sciences de la vie, puis à la croisée de celles-ci et des sciences humaines et sociales, des centres de synthèse et d'analyse dont le nombre a doublé à l'échelle mondiale depuis 2009. Ces démarches se construisent au bénéfice d'une nouvelle approche, collective, du traitement de questions scientifiques majeures via la mise en commun de grands jeux de données. En France, le CESAB² constitue un très bon exemple de cette évolution.

Pendant la même période, les contraintes socio-économiques ont favorisé, tant au niveau national qu'euro-péen, des stratégies scientifiques susceptibles d'apporter à court ou moyen termes des solutions à de grands défis sociétaux, dans une perspective de croissance économique et de création d'emplois et dans un contexte de globalisation des échanges et de changement global (Stratégie Nationale de la Recherche, H2020³, voir aussi Mace, 2013). Ce contexte a également favorisé une évolution des priorités de recherche qui a été concomitante d'un changement de paradigme en matière de perception de la biodiversité par les acteurs de la société au bénéfice d'une vision privilégiant l'utilité de la biodiversité, et plus généralement de la nature, pour le fonctionnement et le bien-être des sociétés humaines. On a vu ainsi la notion de services écosystémiques s'imposer comme

² Centre d'analyse et de synthèse sur la biodiversité

³ Horizon 2020 : programme de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation

justification du besoin de protéger le fonctionnement des écosystèmes et la biodiversité, et les services devenir un objet majeur de recherche (Mace, 2014). Parallèlement, et en complément, les évaluations et des travaux de recherche portant sur l'économie de la biodiversité se sont développés (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009) et ont suscité dans le même temps des réflexions croissantes sur les valeurs de la biodiversité (Maitre d'Hôtel et Pelegrin, 2012 ; Guiral, 2013).

Le paysage national de la gouvernance de la recherche sur la biodiversité a été marqué par la création de l'alliance AllEnvi en 2010, avec la mise en place, au sein des groupes de travail thématiques de l'alliance, d'un groupe de travail biodiversité. Cette prise en compte du champ biodiversité n'a toutefois pas trouvé son pendant dans les programmes de financement de la recherche. En effet, corollaire des changements que nous venons d'évoquer, l'identification par les agences de financement du thème biodiversité comme pouvant faire l'objet à lui seul d'un programme de recherche dédié, et donc de financements ciblés, s'est étioyée. Le programme 6^e extinction de l'Agence nationale de la recherche (ANR) en 2009 n'a pas eu de suite, même si le programme BioAdapt a ensuite mobilisé une partie de la communauté de la recherche sur la biodiversité. A l'échelle européenne, les appels à projets de l'ERAnet BiodivERsA, incluant un financement de l'ANR, ont pris à partir de 2008 le relais des efforts nationaux, mais en mettant l'accent sur des projets de dimension internationale et sur des domaines d'investigation particuliers, qu'il s'agisse des liens entre biodiversité et services écosystémiques, des scénarios de biodiversité ou des invasions biologiques (voir aussi Matei *et al.*, 2011 pour une analyse de la place de la biodiversité dans le thème « Environnement » du 7^e Programme Cadre).

En ce qui concerne la gouvernance de la gestion de la biodiversité, la période considérée a été caractérisée par l'élaboration et la publication de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB) 2011–2020 qui, autour du partage de l'ambition de préserver, restaurer, renforcer et valoriser la biodiversité, tout en assurant l'usage durable et équitable de celle-ci, s'appuie sur une plus grande implication des parties prenantes, et la favorise. Par rapport à une tradition ancrée dans le temps qui privilégiait la protection des espèces, la SNB a aussi mis l'accent sur le besoin de préservation et de restauration des écosystèmes et de leur fonctionnement. La période a vu aussi la préparation de la future Agence française de la biodiversité (AFB).

Au plan international, en octobre 2010, les parties à la Convention sur la diversité biologique (CDB) ont adopté un plan stratégique de 10 ans (les objectifs d'Aichi) visant à réduire les atteintes à la biodiversité, améliorer son état et son utilisation durable pour le bien de tous. Parallèlement, le protocole de Nagoya a établi le principe de règles d'accès aux ressources génétiques et de partage des bénéfices issus de leur utilisation (les règles « d'accès et partage des avantages » souvent résumées sous l'acronyme APA ou ABS en anglais), un principe repris dans un règlement européen et dans la loi biodiversité au niveau français. A l'échelle européenne, la stratégie de l'Union européenne pour la biodiversité, finalisée en 2011, met en avant le besoin d'enrayer la perte de biodiversité et la dégradation des services écosystémiques dans une ambition à plus long terme de protection, et de rétablissement du capital naturel que représentent la biodiversité et les services.

En avril 2012 était créée l'IPBES, la Plateforme internationale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, qui place la biodiversité au premier rang des préoccupations mondiales. De manière non surprenante, eu égard à la profondeur historique du projet, le cadre conceptuel de l'IPBES s'inscrit dans une perspective fortement teintée d'utilitarisme, où la biodiversité est d'abord vue comme utile au développement des sociétés humaines (la vision « Nature for people » de Mace, 2014). Un ambitieux programme de travail, comprenant plusieurs évaluations thématiques, considérées comme prioritaires par les gouvernements et les porteurs d'enjeux, des évaluations régionales et une évaluation globale à l'échelle de la planète, a été défini en 2013. Ce programme de travail, qui mobilise un grand nombre d'experts internationaux, ne manquera pas d'influencer la recherche internationale compte tenu du fait que les rapports qui en résulteront mettront probablement en avant de nombreuses lacunes de connaissances qui nécessiteront un effort de recherche particulier.

Le besoin d'évaluation tant de l'état des écosystèmes que des services que l'homme en retire a motivé le lancement en 2009 de l'évaluation nationale des écosystèmes du Royaume Uni (UK-NEA), une entreprise de très grande ampleur dont les premiers résultats sont sortis en 2011. A l'échelle européenne, le programme MAES (Mapping and Assessment on Ecosystems and their Services) a été lancé en 2012 et est relayé en France par le programme EFES (Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques).

LE BESOIN D'UNE NOUVELLE PROSPECTIVE

Pourquoi était-il nécessaire de produire une nouvelle prospective pour la recherche française sur la biodiversité alors même que celle de 2009 reste d'actualité comme socle des actions de la FRB et qu'elle a influencé directement ou indirectement les priorités de recherche nationales ou européennes ?

La première raison réside dans les changements majeurs que nous venons d'évoquer concernant le contexte politique et scientifique de la biodiversité : les priorités des grandes stratégies de recherche nationales ou internationales ont changé, elles aussi en lien avec le contexte socio-économique et la prise en compte du changement global, au détriment d'une « visibilité » du champ de la recherche sur la biodiversité, une évolution relayée par de grands programmes de recherche internationaux comme Future Earth⁴. Le conseil scientifique de la FRB considérant pour sa part que l'identification d'un champ de recherche spécifique à l'étude de la biodiversité dans son acception la plus large reste pertinent, il était donc nécessaire de faire un point d'étape sur les connaissances sur la biodiversité et leurs lacunes, de rappeler que la science évolue rapidement et peut remettre en cause ou profondément modifier, des concepts sur lesquels s'appuient, avec un temps de latence, les politiques publiques et qu'il faut donc régulièrement reposer les termes du défi, tel que vu par les scientifiques et discuté, et souvent partagé, par les porteurs d'enjeux impliqués.

La seconde raison, tout aussi importante, est liée au constat qu'il reste indispensable de faire progresser les connaissances, et donc de renforcer la recherche sur la biodiversité, dans un contexte où cette dernière fait face, tant dans les environnements terrestres que marins, à des menaces croissantes dans un contexte économique et démographique mondial contraignant. L'hypothèse d'une 6^e extinction, pour une large part

liée aux activités humaines, bien que fortement débattue du fait du caractère encore fragmentaire des données quantitatives disponibles, reste d'actualité (Barnosky *et al.*, 2011 ; Bellard *et al.*, 2012 ; Dirzo *et al.*, 2014). Si des efforts significatifs ont été entrepris dans différents pays, et par différents acteurs, pour mieux gérer la biodiversité et la préserver, ces entreprises restent fragiles et très dépendantes de la situation économique et des rapports de force politiques locaux (cas de la réduction de la déforestation en Amazonie brésilienne par exemple, cf. Nolte *et al.*, 2013 ; Nepstad *et al.*, 2014) ; ailleurs, notamment en Asie du Sud-Est ou en Afrique, les pressions sur la biodiversité se sont très fortement accrues et l'état de celle-ci continue de se dégrader (cf. notamment Costello *et al.*, 2010 ; Butchart *et al.*, 2010 ; Pereira *et al.*, 2012 ; Tittensor *et al.*, 2014), dans un contexte où à la pression anthropique directe s'ajoute les effets multiples du changement climatique.

L'objectif d'un tel exercice de prospective est de guider les actions de la FRB, dans la plénitude de son rôle à l'interface de la recherche et des parties prenantes, et, au delà, de guider les choix d'AllEnvi et, à travers cette dernière, de l'ANR. L'objectif est aussi de pouvoir suggérer des pistes d'actions coordonnées aux instituts de recherche fondateurs de la FRB et d'informer les ministères concernés sur les besoins de recherche avec l'ambition de pouvoir influencer sur les choix de politique de recherche à l'échelle de la communauté européenne.

⁴ Future Earth : initiative internationale pour coordonner et promouvoir les recherches sur les changements environnementaux globaux et le développement durable.

LA PROSPECTIVE DE 2009, QUELQUES RAPPELS

La prospective de 2009 avait défini 4 axes de recherche prioritaires :

1. **Documenter** l'état de la biodiversité
2. **Comprendre** les mécanismes qui agissent sur la dynamique de la biodiversité
3. **Modéliser et scénariser** les changements de la biodiversité
4. **Mieux intégrer** la biodiversité dans les activités humaines

LES AXES DE LA PROSPECTIVE 2009

1 · Documenter : renforcer les approches et les outils documentant l'état de la biodiversité

Cet axe mettait en avant la nécessité et l'ambition de mobiliser les nouveaux outils méthodologiques et technologiques pour accélérer la description de la biodiversité et pour organiser et mieux intégrer les données et informations acquises. Cela contribue notamment à quantifier les atteintes à la biodiversité et les phénomènes d'érosion, mais aussi à d'alimenter les démarches de modélisation et de synthèse.

2 · Comprendre les mécanismes écologiques et socio-économiques sous-tendant la dynamique de la biodiversité et des services écosystémiques

Cet axe mettait en avant l'importance de décrire et d'analyser les dynamiques couplées de la biodiversité, des écosystèmes et des systèmes homme-environnement à différents niveaux, notamment pour alimenter les démarches de modélisation. Cela implique l'analyse des réponses des éléments constitutifs de la biodiversité aux changements globaux, mais aussi celles qui apparaissent à des niveaux d'organisation supérieurs (communautés, écosystèmes, systèmes homme-environnement).

3 · Modéliser et scénariser les changements de biodiversité

Cet axe proposait de renforcer et de mieux coordonner l'effort de la communauté dans le domaine de la modélisation de la biodiversité, en vue de proposer des scénarios comme outils d'aide à la décision, pour les politiques publiques, mais aussi pour la gestion des ressources naturelles. Deux enjeux majeurs sont plus particulièrement soulignés : celui de parvenir à mieux

gérer les changements d'échelles pour intégrer les dynamiques locales, régionales et globales, et celui d'améliorer le couplage entre processus écologiques, génétiques, physico-chimiques et socio-économiques.

4 · Mieux intégrer la biodiversité dans les activités humaines et soutenir les innovations

Cet axe soulignait la nécessité de développer les recherches sur les méthodes de conservation (en lien avec les sociétés), sur la valorisation de la biodiversité comme support d'activités durables (dont les biotechnologies), mais aussi sur la biodiversité dans le système juridique. Mieux intégrer la biodiversité dans les activités humaines suppose aussi de développer les interfaces entre acteurs de la biodiversité, notamment pour mobiliser l'expertise dans le cadre des processus de décision publics et privés.

À ces axes avait été ajoutée une réflexion transversale sur les valeurs de la biodiversité

Dix priorités de recherche avaient été définies :

1. Renforcer et fédérer la recherche sur la modélisation et la scénarisation des dynamiques de la biodiversité.
2. Promouvoir la recherche sur les services écosystémiques et les valeurs de la biodiversité.
3. Développer les bases scientifiques pour l'innovation dans le champ de la valorisation de la biodiversité.
4. Renforcer la connaissance des compartiments de la biodiversité les plus mal connus.
5. Renforcer et coordonner au niveau national les observatoires de la biodiversité.
6. Étudier les mécanismes clés tels que le rôle des processus évolutifs ou des agencements spatiaux.
7. Développer le caractère interdisciplinaire des recherches.
8. Favoriser le croisement des problématiques tempérées, tropicales et méditerranéennes, des problématiques terrestres et marines, ainsi que des problématiques sauvages et domestiques.
9. Repenser la formation pour mieux préparer aux enjeux de la biodiversité.
10. Aider la communauté scientifique à s'organiser pour répondre au besoin croissant d'expertise de la part de la société.

Ces priorités ont été à l'origine des principaux programmes, actions et études de la FRB depuis 2009 (programme modélisation et scénarios de la biodiversité et sa déclinaison africaine, projet ECOSCOPE, étude sur les valeurs de la biodiversité, etc.). Même si l'avancée des recherches a fait significativement progresser la connaissance pour plusieurs des points ci-dessus et si l'évolution des démarches et des dispositifs de recherche qui y était souhaitée a contribué à ces avancées, ces priorités restent d'actualité en 2015.

L'ORGANISATION DE LA PROSPECTIVE 2015: LA DÉMARCHE, LE RÔLE DU COS

En 2009, le travail de prospective avait été réalisé par le seul conseil scientifique de la FRB, enrichi de quelques experts externes. Le conseil d'orientation stratégique de la FRB, le COS, avait apporté un regard critique qui était venu s'ajouter dans le document de présentation au texte du conseil scientifique, ce dernier restant non modifié. Pour cette nouvelle prospective, il a été convenu de procéder de manière sensiblement différente. Le conseil scientifique a défini les axes de réflexion et a rédigé les textes initiaux. A partir de là des réunions de travail ont réuni des membres du conseil scientifique et du COS qui ont discuté des principaux points constitutifs de ces textes pour les amender ou les enrichir. Dans un second temps, les coordonnateurs au titre du conseil scientifique de chacun des axes, ainsi que l'équipe FRB chargée du suivi de la prospective ont repris les textes en veillant à ce que la multiplicité des regards soit préservée.

Le travail de prospective s'est construit autour des six axes ci-après, chacun structuré autour de ce qui constituait les grands enjeux de la prospective 2009: i) documenter, ii) comprendre, iii) modéliser et scénariser.

1. Valeurs et acteurs
2. Fonctions et services
3. Pressions et risques
4. Réponses et adaptation
5. Systèmes d'information et de connaissances (transversal)

Une réflexion sur « territoires, innovations et actions », associant le conseil scientifique et le COS, ainsi que des experts de différents horizons, a complété le travail sur les axes précédents et a permis de dégager des pistes de réflexion sur l'innovation sous toutes ses formes. Ces pistes sont reprises dans la partie conclusive de ce document.

Cette approche, sensiblement différente de celle adoptée en 2009, offre un autre angle de lecture des besoins de recherche dans le champ de la biodiversité, tout en se référant aux besoins identifiés à l'époque. La prospective de 2015 ambitionne donc de rappeler les enjeux fondamentaux de la recherche sur la biodiversité en soulignant leur unité et leur continuité, mais également de mettre en lumière les fronts de science ayant progressé fortement et de détailler davantage les questions actuelles autour ces sujets.



TABLEAU DES PRIORITÉS DE RECHERCHE

VALEURS ET ACTEURS	
Documenter	
Priorité 1.1	Décrire la nature, les sources et le fondement des valeurs de la biodiversité en fonction des sociétés et des acteurs.
Priorité 1.2	Progresser dans la mise au point d'outils de mesure des valeurs en prenant en compte la diversité des perceptions et représentations.
Comprendre	
Priorité 1.3	Progresser dans la compréhension des liens biodiversité(s)- société(s) en mobilisant différents cadres épistémologiques et conceptuels.
Priorité 1.4	Interroger la contribution de l'évaluation à la gouvernance de la biodiversité.
Modéliser & scénariser	
Priorité 1.5	Scénariser autrement le devenir de la biodiversité.
Priorité 1.6	Progresser dans la modélisation des systèmes couplés homme-environnement.

FONCTIONS ET SERVICES	
Documenter	
Priorité 2.1	Mise en place de cadres conceptuels et méthodologiques pour quantifier la valeur biophysique des services écosystémiques.
Priorité 2.2	Développer et tester des méthodes robustes pour analyser et quantifier les interactions positives (synergies) ou négatives (arbitrages) entre services ou entre services et biodiversité.
Priorité 2.3	Réaliser des analyses rétrospectives, pour mettre en évidence les échelles de temps des dynamiques des services écosystémiques.
Priorité 2.4	Continuer de progresser dans les méthodes d'évaluation, économiques et non-économiques.
Priorité 2.5	Quantifier les flux de services.
Comprendre	
Priorité 2.6	Continuer de progresser dans la compréhension des relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes.
Priorité 2.7	Comprendre les mécanismes écologiques (en particulier fonctionnels) sous-tendant les interactions entre services, et entre services et biodiversité.
Priorité 2.8	Comprendre le rôle des services écosystémiques dans les processus de dynamique des systèmes couplés homme-environnement, prenant en compte les dynamiques humaines au sens large.
Priorité 2.9	Comprendre les modalités de mise en œuvre d'une approche de la gestion de l'environnement et du développement territorial incorporant les services écosystémiques.
Modéliser & scénariser	
Priorité 2.10	Modéliser les trajectoires d'évolution des services sur la base de celles de la biodiversité et des écosystèmes.
Priorité 2.11	Modéliser la dynamique des interactions entre services écosystémiques.
Priorité 2.12	Progresser dans la représentation des services écosystémiques dans la modélisation pour la scénarisation.

PRESSIONS ET RISQUES

Documenter

- Priorité 3.1 Mieux documenter la biodiversité.
- Priorité 3.2 Documenter et quantifier les différentes pressions et en hiérarchiser les effets.
- Priorité 3.3 Évaluer la pertinence et les limites de métriques permettant la comparaison de quantifications d'impacts.

Comprendre

- Priorité 3.4 Mieux comprendre le fonctionnement de la biodiversité pour mieux évaluer l'incidence des différentes pressions.
- Priorité 3.5 Mieux comprendre les réponses de la biodiversité aux pressions.
- Priorité 3.6 Développer les recherches en sciences sociales pour appréhender, entre autres, le risque constitué par le déni de perte de biodiversité.

Modéliser & scénariser

- Priorité 3.7 Modéliser les conséquences des pressions au niveau écologique.
- Priorité 3.8 Modéliser l'impact des pertes de biodiversité sur différents aspects du fonctionnement des communautés et des écosystèmes (et par extension l'impact sur les services).
- Priorité 3.9 Modéliser et scénariser les effets des politiques publiques, des programmes de conservation et des mesures de gestion de la biodiversité.

RÉPONSES ET ADAPTATION

Comprendre

- Priorité 4.1 Comprendre les processus de l'adaptation en fonctions de différents mécanismes de flexibilité.
- Priorité 4.2 Étudier le couplage entre sources de flexibilité.

Modéliser & scénariser

- Priorité 4.3 Proposer des indicateurs du potentiel d'adaptation.
- Priorité 4.4 Intégrer les mécanismes de flexibilité dans les scénarios de biodiversité.

SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE CONNAISSANCES

- Priorité 5.1 Coordonner et pérenniser les dispositifs existants.
- Priorité 5.2 Favoriser une utilisation accrue des données existantes.
- Priorité 5.3 Évaluer et combler les lacunes d'information et mobiliser de nouvelles techniques d'observation.
- Priorité 5.4 Relever le défi taxonomique et sémantique, élaborer des référentiels.
- Priorité 5.5 Articuler ces systèmes avec les autres bases de données environnementales ou socio-économiques .
- Priorité 5.6 Développer les liens avec les acteurs de la société.



ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

Dans la prospective de 2009, la question des valeurs de la biodiversité constituait un axe de recherche transversal, sous l'intitulé « Un cadre de référence collectif et un enjeu clé pour les recherches en biodiversité ». Le conseil scientifique est parti du constat que l'efficacité des politiques publiques de préservation de la biodiversité est contrariée par les difficultés à traduire la valeur de la biodiversité en termes concrets, alors même que la prise en compte de la valeur de la biodiversité par la société avance (démarches d'évaluation des services écologiques, opérations de compensation, comptabilités environnementales...), sans pour autant pouvoir s'appuyer sur des référents scientifiques et sur une formulation explicite des fondements et des enjeux.

Les deux études successives menées par la FRB depuis 2010 sur l'état des lieux de la recherche sur les valeurs de la biodiversité, puis sur l'appréhension de ces valeurs par les acteurs socio-économiques et les stratégies de positionnement associées, ont montré un degré croissant d'appropriation de ces questions, mais également des besoins d'explicitation de certaines notions et de leur portée opérationnelle. Les recherches sur l'évaluation de la biodiversité et des services écosystémiques (depuis la dimension biophysique jusqu'à la dimension monétaire) se sont multipliées au cours des dernières années, accompagnées également par le développement de démarches réflexives et de travaux conceptuels sur les fondements même de l'approche par les valeurs et par les services écosystémiques.

Or, la dichotomie souvent mise en avant entre valeurs instrumentale et intrinsèque ne rend pas compte de la diversité des valeurs de la biodiversité abordées par la recherche et qui sont sous-jacentes aux motivations des acteurs. Ces valeurs sont souvent liées à différentes perceptions de la biodiversité et de ses relations avec les sociétés humaines. En ce sens, le

débat conceptuel sur les valeurs de la biodiversité a des implications fondamentales pour l'action, selon que l'on privilégie plus ou moins la biodiversité « patrimoniale » par rapport à la biodiversité « utile » ou des approches fondées sur la protection réglementaire par rapport à des dispositifs incitatifs.

Aussi, pour l'actualisation de la prospective, le choix a été fait de lier « valeurs » et « acteurs » de la biodiversité tant les réflexions sur les valeurs de la biodiversité ne sauraient être menées indépendamment de la prise en compte de la diversité des acteurs, parmi lesquels il faut comprendre les chercheurs eux-mêmes. S'il convient de garder à l'esprit que le rôle de la recherche est de fournir des connaissances, des mesures, des indicateurs, des dispositifs (comme par ex. les recherches participatives), des outils d'aide à la décision ou encore indiquer des priorités, des alertes, celle-ci ne saurait pour autant se substituer aux acteurs publics et privés pour arbitrer et décider.

Les fonctions et services écosystémiques associés à la biodiversité, qui font l'objet de l'axe 2 de cette prospective, occupent également une place importante dans la réflexion sur les valeurs. Deux dimensions sont mises en avant plus particulièrement concernant les liens étroits entre ces deux thèmes : d'une part par le risque de simplification, de réduction et d'anthropocentrisme des rapports que les sociétés humaines entretiennent avec le monde vivant, que les notions de fonctions et de services sont susceptibles de générer, et d'autre part, l'utilisation de plus en plus fréquente de ces notions par la société civile, les associations et les politiques, en ce qu'elles permettent d'articuler valeurs de la nature et action. Pour autant, au-delà du cadre de pensée que constituent les services écosystémiques, la recherche peut en proposer d'autres, s'interroger sur les différents concepts, leur émergence, et analyser leur portée opératoire pour la biodiversité.

Priorité 1.1 : Décrire la nature, les sources et le fondement des valeurs de la biodiversité en fonction des sociétés et des acteurs

La sémantique actuelle de la biodiversité (capital ou actifs naturels, patrimoine naturel, services écosystémiques, « banques » de compensation) est empreinte d'une rhétorique économique rarement explicitée. Pour s'attacher à décrypter les fondements des valeurs associées à la biodiversité, il faut tenter de dépasser l'opposition entre valeur intrinsèque et valeur instrumentale. L'approche en terme de valeur patrimoniale appelle également des clarifications et un approfondissement.

Les différents types de construction des valeurs de la biodiversité méritent d'être précisés : sont-elles « objectives », universelles, liées à un support ou une activité ou encore négociées, issues d'accords entre acteurs ? Quelles médiations permettent de mieux prendre en compte des valeurs universelles qui ne sont pas représentées dans les jeux d'acteurs ? Par exemple : qui parle pour les générations futures ?

Il convient également de mieux décrire les liens entre les valeurs associées à la biodiversité et les motivations et décisions des acteurs : Comment les différentes valeurs contribuent-elles à orienter les décisions, à définir les priorités entre services ? Comment ces valeurs permettent-elles d'articuler les décisions à court terme et la prise en compte du long terme et des enjeux locaux et globaux ?

Priorité 1.2 : Progresser dans la mise au point d'outils de mesure des valeurs en prenant en compte la diversité des perceptions et représentations

Une évaluation critique des outils et méthodes existants dans leur application à la biodiversité (sensibilité, validation scientifique, etc.) reste à faire, considérant que certaines sources de valeurs sont plus faciles à estimer que d'autres (voir aussi axe fonctions et services). Les travaux sur la mise au point d'indicateurs et de fonctions de valeurs ouvrent des pistes de travail. Il faut travailler sur les métriques et progresser sur la prise en compte des perceptions et représentations et du risque de contingence associé.

Priorité 1.3 : Progresser dans la compréhension des liens biodiversité(s)/société(s) en mobilisant différents cadres épistémologiques et conceptuels

Contribuer à l'émergence de cadres conceptuels opérationnels, dynamiques et systémiques, est essentiel pour développer des approches critiques de la relation entre valeurs de la biodiversité et services écosystémiques. De ce point de vue, la prise en compte de la diversité des valeurs de la biodiversité, et notamment la notion de valeur d'existence transforme les termes du débat en interrogeant le paradigme utilitariste classique des économistes (Amigues, Chevassus, 2011).

L'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MA, 2005), a contribué à mettre en avant la notion de bien-être. Or, cette notion même, sa mesure et la mesure du rôle de la biodiversité dans ce bien-être sont loin d'avoir été épuisés par les approches du MA. D'autres cadres épistémologiques peuvent être mobilisés pour étudier les relations biodiversité(s)/société(s) tels la théorie du "Care", la notion de solidarité écologique, la notion de résilience, le concept de justice ou de responsabilité environnementale, la responsabilité sociétale, le développement durable ou encore la multifonctionnalité de la nature.

Priorité 1.4 : Interroger la contribution de l'évaluation à la gouvernance de la biodiversité

Les liens entre les évaluations de la biodiversité et la décision méritent d'être mieux appréhendés et renforcés. Comment sont utilisées les valeurs estimées pour les décisions politiques et de gestion ? Considérer l'ensemble ou des éléments de la biodiversité modifie-t-il la hiérarchisation des priorités ou favorise-t-elle une gestion par compartiments ? Comment prendre en compte le passage d'entités définies (espèces/espaces) à l'immatériel (certains services, banques d'unités de biodiversité pour la compensation par exemple) dans la gestion de la biodiversité ?

L'évaluation des impacts des aides publiques impactant la biodiversité (subventions agricoles, aides à la pêche...) devrait être entreprise de façon systématique (par exemple sur la base des travaux du Centre d'Analyse Stratégique en 2011). Quels sont les rôles respectifs, en termes de dosage macroéconomique (policy mix), des instruments dits de marché (cf. les paiements pour services environnementaux, les « marchés » de compensation) face aux instruments réglementaires ?

L'analyse et la prise en compte du coût de la protection de la biodiversité représentent aussi un domaine à renforcer : Quels enjeux en termes d'action résultent

du fait d'évaluer par les prix contingents, ou par le coût, le maintien de potentialités écologiques ? Comment concilier les différentes valeurs exprimées par les acteurs en termes de risques (supportés, évités), de bénéfices, de coûts ? La question de l'évaluation des

préjudices se pose également de manière récurrente et mérite un effort d'analyse et d'harmonisation, (typologie des dommages, méthodes d'évaluation économique de ces dommages en vue de la réparation des préjudices, analyse des décisions de justice, etc)⁵.

> MODÉLISER ET SCÉNARISER

Le champ de la biodiversité et des services écosystémiques associés présente des spécificités importantes pour ce qui est de la prise en compte du futur et d'actualisation, en raison notamment des phénomènes d'irréversibilité et des effets de seuils. La question du lien entre les valeurs de la biodiversité et les acteurs interroge les approches de modélisation et de scénarisation de la biodiversité à travers des approches basées sur la discussion entre acteurs, sur l'analyse des conflits de valeurs et de représentations, mais également en interrogeant sur la validité de l'agrégation de ces valeurs. Cela ouvre des perspectives de recherche nouvelles pour renforcer la portée opératoire de ces démarches pour l'action. Les poids relatifs des différentes composantes de la valeur et leur prise en compte dans la modélisation apparaît ici particulièrement important.

Priorité 1.5: Scénariser autrement le devenir de la biodiversité

Cela suppose de considérer la diversité des représentations des acteurs en termes de choix et de concertation et de prendre en compte la valeur comme langage de négociation entre acteurs (différents systèmes de valeurs, pluralité des points de vue...). Cela suppose également d'examiner la validité des indicateurs agrégés de la valeur (définition, métrique et sens commun).

Dans cet esprit, les recherches sur l'équivalence, sur la substituabilité entre services et sur la stabilité des valeurs de la biodiversité (stabilité dans le temps et dans l'espace, stabilité en fonction des acteurs concernés et des usages de la biodiversité) nourrissent les avancées de la modélisation. Il convient d'aborder également la question des aménités négatives et de mieux préciser les sources d'incertitude sur les valeurs qui sont dues aux connaissances insuffisantes sur la biodiversité et les services associés (voir axe 2).

Priorité 1.6: Progresser dans la modélisation des systèmes couplés homme-environnement

Cet enjeu concerne tant les modèles couplés globaux (à des échelles larges, voire très larges) que les modèles basés sur des méthodes participatives (modèles multi-agents, scénarios territoriaux co-construits ou autres méthodes de modélisation non algorithmiques), qu'il s'agit de coupler à des modèles de dynamique des écosystèmes. Cela suppose de s'appuyer sur des cadres conceptuels robustes pour prendre en compte la complexité des contextes sociaux. La notion de résilience, entendue comme la capacité d'un écosystème ou d'un système social à retrouver une trajectoire viable à la suite d'une perturbation, peut apporter une contribution importante à ces développements.

⁵ Etude Valeurs de la biodiversité, FRB, déjà citée. Voir également Nomenclature des préjudices environnementaux, Neyret L., Martin G.J. (dir.), L.G.D.J. 2012.



ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

Suite au Millennium Ecosystem Assessment (MA), et ensuite à l'étude TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), par exemple (ou pour la France au rapport Chevassus-au-Louis du Centre d'Analyse Stratégique), l'idée que conserver la biodiversité peut se justifier pour des raisons utilitaristes (au sens large) a progressé dans les sphères politiques et économiques. Ainsi, suite à l'évaluation de la stratégie pour la biodiversité pour 2010 et à l'émergence d'enjeux autour de ces fonctions utilitaires, les objectifs d'Aichi pour 2011–2020 ont pour la première fois mis en avant comme priorités, non seulement la conservation de la biodiversité mais aussi celle des services écosystémiques. Il précise les éléments suivants :

- Préambule : « La diversité biologique permet le fonctionnement des écosystèmes et fournit des **services écosystémiques** essentiels au bien-être humain... »
- Vision : « D'ici à 2050, la diversité biologique est valorisée, conservée, restaurée et utilisée avec sagesse, **en assurant le maintien des services fournis par les écosystèmes**, en maintenant la planète en bonne santé et en procurant des avantages essentiels à tous les peuples. »
- Exemple parmi les 10 objectifs - But stratégique D : Renforcer les avantages retirés pour tous de la diversité biologique et des services fournis par les écosystèmes.

Ces priorités ont ensuite été reprises dans la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB) qui met en avant le « capital écologique » et son incorporation dans l'économie (Orientation stratégique C) et la notion d'un usage durable et équitable de la biodiversité.

En pratique, les services écosystémiques (SE) se sont invités dans les prospectives économiques et politiques, ainsi que dans les projets d'aménagement du territoire. Pour autant, et malgré une progression exponentielle des publications sur le sujet (toutes disciplines confondues), la mise en pratique du concept reste problématique car elle pose :

- **Des défis conceptuels** concernant les quantités à quantifier et les cadres conceptuels de l'évaluation. Des progrès conceptuels certains ont été faits depuis 2009, qui permettent en principe de poser au moins quelques bases de consensus sur la place des services à l'interface entre biodiversité,

écosystèmes et société, mais les analyses plus approfondies tendent aussi à mettre en évidence la complexité du concept – par exemple pour identifier « l'offre » de services (c.-à-d. le potentiel de fourniture de services) par un écosystème face à la demande de services par la société...

- **Des défis méthodologiques**, que ce soit pour les sciences écologiques pour établir des relations quantitatives entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes et, par suite, une quantification biophysique des fonctions supports des SE ; ou que ce soit pour l'économie pour développer des méthodes d'évaluation économique et monétaire ; ou encore pour les sciences humaines en ce qui concerne l'intégration des SE dans la gouvernance environnementale, la mise en évidence des valeurs non économiques ou les aspects éthiques de l'évaluation.
- **Des défis considérables concernant les données et leur disponibilité**
- **Le défi de l'interdisciplinarité**
- **Des défis de communication** et de transfert auprès des acteurs comme auprès des « techniciens » en charge des évaluations (p. ex. bureaux d'étude).
- **Des défis d'application** dans le contexte socio-économique et politique, en particulier le développement d'outils permettant une conservation ou même une augmentation effective des services écosystémiques tout en bénéficiant à la biodiversité.

L'approfondissement des connaissances sur les liens entre la biodiversité et les services écosystémiques est plus que jamais un enjeu d'actualité. La mise en évidence de synergies entre protection de la biodiversité et disponibilité des services (qui trouvent des exemples emblématiques, notamment dans le domaine de l'agroécologie ou de la restauration des zones humides) a fourni des avancées encourageantes en ce sens. La perspective adoptée ici est donc bien celle de l'intégration de l'approche par les services écosystémiques dans le domaine de la recherche sur la biodiversité (cette approche n'étant pas exclusive), en vue d'aider à répondre à l'enjeu que représente la protection de la biodiversité, et en particulier la biodiversité ordinaire, et la nécessité d'en ralentir l'érosion pour une gouvernance durable et partagée des territoires.

Des demandes d'évaluation de services écosystémiques de l'échelle locale, à l'échelle régionale, nationale et globale, sont faites chaque jour par des décideurs, des gestionnaires ou des entrepreneurs. Ces demandes sont souvent traitées dans l'urgence, et selon un état de l'art insuffisant. La recherche doit donc continuer de contribuer à fonder les évaluations sur des bases conceptuelles et méthodologiques solides. Il en résulte 5 priorités de recherche.

Priorité 2.1 : Mise en place de cadres conceptuels et méthodologiques pour quantifier la valeur biophysique des SE de manière plus fine que par fonction de transfert (ex. valeur unique par type de couverture des terres).

Il est nécessaire de prendre en compte explicitement les effets de la biodiversité, en particulier fonctionnelle – sur la base des avancées de compréhension fondamentale (cf. « Comprendre »), mais en devant composer avec les limitations par la disponibilité des données. Une attention particulière devra être portée au développement de méthodes spatialement explicites, y compris avec l'identification des échelles pertinentes. L'objectif ultime devrait être la standardisation des méthodes au travers de guides de bonnes pratiques et de boîtes à outils. Une attention particulière devra être portée à développer et intégrer dans les bonnes pratiques les étapes de validation de quantification de l'incertitude.

Priorité 2.2: Développer et tester des méthodes robustes pour analyser et quantifier les interactions positives (synergies) ou négatives (arbitrages) entre services ou entre services et biodiversité :

- Points chauds/froids (Hot/cold spots) de SE et identification de leurs recouvrement avec les points chauds de biodiversité ; analyses des variables explicatives (facteurs environnementaux, gestion des terres, variables sociales) de ces points chauds/froids (ex. climat, sols, gestion)
- Documenter les relations deux-à-deux ou multiples entre services ; ou entre la biodiversité et différents services – et leur dépendances à différents facteurs (environnement, humains)

Priorité 2.3: Réaliser des analyses rétrospectives, si possible spatialement explicites, concernant le passé plus ou moins lointain, y compris par des approches d'écologie historique et la paléoécologie. Ces analyses permettront en particulier d'identifier les points de rupture, tels que : transitions systémiques, effondrement d'écosystèmes et de leurs services. Elles mettront également en évidence les échelles de temps des dynamiques des services écosystémiques, les différentes échelles associées à différents SE, et les processus

de type effet retard. Leur reconnaissance permettra en particulier d'alimenter les démarches de scénarisation et notamment de scénarisation territoriale.

Priorité 2.4 : Continuer de progresser dans les méthodes d'évaluation, économiques et non-économiques

Il est donc nécessaire de :

- Identifier, par des démarches participatives, les bénéficiaires de différents services et caractériser la diversité de leurs enjeux, horizons temporels, intérêts et risques, et lorsqu'il y a variation des caractéristiques ou des intensités de ces services identifier les gagnants et les perdants.
- Quantifier, par des démarches participatives, la demande de services écosystémiques, pour analyser la congruence entre « l'offre » par les écosystèmes (potentiel de fourniture) et la demande
- Identifier des demandes potentiellement antagonistes, notamment pour des usages concurrents de l'espace, dans la perspective éventuelle de développer des outils incitatifs comme leviers d'action sur la demande de services. Il faut aussi examiner leur degré d'antagonisme et les façons éventuelles de le réduire, afin de faciliter l'élaboration de règles de gestion.
- Lever les verrous conceptuels et méthodologiques de l'évaluation économique à travers :
 - une réflexion sur les limites des évaluations monétaires effectuées en agrégeant les résultats issus de différentes méthodes d'évaluation (les limites de chaque méthode prise individuellement étant relativement bien connues) ;
 - le renforcement de la robustesse des méthodes fondées sur les « préférences révélées » et des méthodes d'approche de la valeur intrinsèque, en explorant de nouvelles voies d'appréciation des préférences, s'appuyant sur le constat que les individus sont non seulement des consommateurs à la recherche de la satisfaction utilitaire de leurs besoins, mais aussi et surtout des citoyens qui portent des jugements et effectuent des choix qui dépassent leurs seuls intérêts individuels.
 - Affiner les méthodes d'évaluation non économiques, y compris pour prendre en compte la multiplicité des valeurs et les jeux entre valeurs et entre acteurs (voir axe 1 « Valeurs et acteurs »).

Priorité 2.5: Quantifier les flux de services, spatiaux à différentes échelles, voire temporels (cf. effets retard ci-dessus), et mettre en relation ces flux avec les flux monétaires, humains, d'énergie ou d'information. On pourra même réfléchir à incorporer explicitement la biodiversité et les SE dans les approches de type Analyse de Cycle de Vie.

On notera parmi les défis et points de blocage potentiels aux progrès sur ces cinq priorités :

- La nécessité de développer des connaissances approfondies des mécanismes de la dynamique des systèmes socio-écologiques et de les mobiliser pour les évaluations de SE afin d'éviter les risques d'approches simplificatrices.
- La nécessité de considérer dans les évaluations de SE les liens avec les différents types de valeurs de la biodiversité et des écosystèmes.
- La nécessité de mettre en place des bases de données, en particulier spatialisées, comportant à la fois des variables nécessaires à l'évaluation biophysique, économique et sociale des SE, et des résultats d'évaluations produites par la recherche, par les structures publiques et par les collectivités territoriales. Ces bases de données doivent être mises à la disposition des acteurs de la recherche, des gestionnaires et des décideurs.

> COMPRENDRE

La demande forte d'évaluation des services écosystémiques nécessite non seulement des efforts conceptuels et méthodologiques, mais aussi de comprendre les processus sous-jacents aux patrons observés, et aux dynamiques passées et futures, ainsi qu'aux interactions spatiales ou entre acteurs. Il en résulte 5 priorités de recherche.

Priorité 2.6: Continuer de progresser dans la compréhension des relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes.

Si des avancées certaines ont été faites sur ce sujet au cours des 20 dernières années, nombre de points restent à éclaircir, y compris :

- Le rôle des différentes composantes de la biodiversité (génétique, taxonomique, fonctionnelle, phylogénétique) dans le fonctionnement des écosystèmes et les mécanismes associés. Les mécanismes fonctionnels et évolutifs d'articulation entre ces niveaux ;
- Le rôle de la diversité trophique *sensu lato* (types d'interaction, réseaux d'interaction, complexité trophique...) dans le fonctionnement des écosystèmes ;
- Le rôle de différentes composantes de la biodiversité pour des fonctions multiples simultanées ;
- Le rôle de différentes composantes de la biodiversité pour le fonctionnement à long terme (stabilité, résilience) ;
- Les échelles spatiales associées aux relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes et les mécanismes d'articulation entre échelles ;
- Les discontinuités écologiques, les rétroactions positives et négatives, et les transitions critiques...

Priorité 2.7: Comprendre les mécanismes écologiques (en particulier fonctionnels) sous-tendant les interactions entre services et biodiversité – selon les échelles.

L'enjeu ici est de traduire les connaissances sur les compromis, les synergies, les contraintes écologiques

et évolutives en hypothèses sur les compromis, les synergies entre services. Il faut ensuite tester ces hypothèses sur des jeux de données diversifiés en termes de modèles d'études et d'échelles spatiales et temporelles.

Priorité 2.8: Comprendre le rôle des services écosystémiques dans les processus de dynamique des systèmes couplés homme-environnement, prenant en compte les dynamiques humaines au sens large.

Ce champ est un front de recherche nouveau et comprend notamment :

- La compréhension des articulations entre échelles biophysiques et échelles humaines, p. ex. les niveaux de gouvernance.
- La compréhension de la position des SE dans des cadres conceptuels dynamiques tels que la résilience des systèmes couplés homme-environnement.
- La compréhension de la place des services écosystémiques dans les décisions des acteurs parmi les différentes composantes des mécanismes de décision (y compris les identités, les modes d'organisation et d'appropriation et les rapports de forces socio-économiques, etc.), et dans les jeux d'acteurs et de leurs valeurs (voir axe 1 « Valeurs et acteurs »).
- L'identification des déterminants des flux de services, y compris leurs relations avec les autres flux : humains, capital, énergie, et les relations de pouvoir entre acteurs...

Priorité 2.9: Comprendre les modalités de mise en œuvre d'une approche de la gestion de l'environnement et du développement territorial incorporant les services écosystémiques

- Mettre l'accent sur les dimensions économiques, sociales et de gouvernance des paiements pour services écosystémiques (PSE).
- Explorer et analyser la notion de « services d'adaptation » au changement climatique ou d'adaptation basée sur les écosystèmes, mettant en exergue les rôles potentiels de la biodiversité pour, d'une part, soutenir les services dont bénéficie actuellement la société (ex. maintien de la production agricole ou forestière face à la variabilité et aux extrêmes climatiques), et d'autre part, pour la fourniture de nouveaux services comme la protection physique contre les événements extrêmes, la modération de la chaleur urbaine ou réduction de l'exposition à la

chaleur des animaux d'élevage.

- Analyser les différentes modalités possibles d'intensification écologique de l'agriculture, de la foresterie ou de l'aquaculture au travers de l'intégration des services écosystémiques dits « intrants » et des externalités positives de la biodiversité et de ses effets sur le fonctionnement des écosystèmes dans les systèmes de production.
- Analyser les méthodes de mise en application de l'équivalence écologique et des actions de compensation appliquées aux services écosystémiques, ainsi que les mécanismes de régulation associés.
- Analyser comment les politiques publiques peuvent prendre en compte les services écosystémiques dans la gestion du territoire et dans les activités de production primaire (agriculture, foresterie, pêche aquaculture), ainsi que pour la conservation de la nature.

> MODÉLISER ET SCÉNARISER

Modéliser et scénariser le fonctionnement des écosystèmes et le devenir des services écosystémiques associés représente un véritable défi au regard des lacunes de connaissances encore à combler, mais auquel il est important de s'atteler sans attendre. Trois priorités principales sont identifiées.

Priorité 2.10: Modéliser les trajectoires d'évolution des services sur la base de celles de la biodiversité et des écosystèmes.

Il s'agit notamment de mieux prendre en compte dans les modélisations pour les scénarios de SE les processus d'assemblage et de recombinaison des communautés biologiques et leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes, en particulier via les changements (ou non) de diversité fonctionnelle.

Priorité 2.11 : Modéliser la dynamique des interactions entre services écosystémiques.

Il s'agit, sur la base de la mise en évidence empirique et de la connaissance des mécanismes sous-jacents aux associations positives et négatives entre services, d'analyser par la modélisation leur devenir dans des scénarios et de proposer des scénarios nouveaux pour favoriser les synergies et la résolution de conflits. Cette approche implique notamment de prendre en compte la question de la substituabilité entre services.

Priorité 2.12: Progresser dans la représentation des services écosystémiques dans la modélisation pour la scénarisation

Il s'agit de représenter explicitement les SE dans la modélisation, en particulier la modélisation prospective. Ceci concernera en particulier les modèles aux échelles larges (dont continentale à globale), que ce soit les modèles couplés homme-environnement représentant les interactions entre écosystèmes et sociosystèmes via les SE ou la production de projections de SE par les modèles de dynamique des écosystèmes. Il s'agira aussi d'alimenter les exercices de modélisation territoriale (voir Valeurs Priorité 6) par des modèles de SE fondés sur une représentation adéquate des processus écologiques et capables de produire des variables pertinentes pour la modélisation des dynamiques sociales (Priorité 10).



AXE 3 : PRESSIONS ET RISQUES

Coordination et rédaction :
Franck Courchamp,
Raphaël Arlettaz
Contributions :
Jean-François Silvain

ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

La biodiversité change sans cesse, à tout niveau d'échelle, suivant dynamiquement les grands bouleversements environnementaux, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Toutefois, avec l'augmentation constante de la pression anthropique sur la biosphère, les trajectoires prises par tous les niveaux d'organisation de la biodiversité (gènes, populations, espèces, communautés, écosystèmes, biomes) montrent un état qui va globalement en se dégradant. Cette tendance résulte essentiellement du produit de l'accroissement sur-exponentiel de la population humaine par l'augmentation du taux de consommation de ressources naturelles *per capita*, ce dernier taux étant également sur-exponentiel (Cohen 2000). Cette pression humaine croissante a, depuis près d'un demi-siècle, été qualifiée de véritable bombe à retardement. Il en résulte que l'humanité vivrait actuellement au-dessus de la capacité de la biosphère à produire de façon durable ces mêmes ressources dont elle a besoin. Notre empreinte écologique équivaldrait actuellement à 1,5 fois ce que la planète Terre est capable de nous fournir.

On estime par ailleurs, qu'actuellement, un quart de la production primaire nette (PPN) globale de la biosphère est monopolisée, directement ou indirectement, par les activités humaines. En ne considérant que les écosystèmes terrestres, cette proportion se monterait même à 50%, voire 55%. Cela signifie que seul le solde – qui va aller en diminuant en raison de notre accroissement, et démographique, et de notre consommation individuelle – est disponible pour le maintien et l'épanouissement de la biodiversité sauvage. Les ressources en eau sont également largement accaparées par l'humanité, qui de plus affecte qualitativement et quantitativement les cycles hydrologiques. Plusieurs études récentes ont tenté d'affiner les risques qu'encourrait notre environnement, et par ricochet la société et l'économie, face aux changements en cours et à venir (horizon scanning, e.g., Sutherland, 2010, 2011, 2012, 2013), ceci dans l'optique d'informer les décideurs politiques sur les grands enjeux futurs afin de tenter d'y parer.

Plus spécifiquement, on distingue deux grands types de pressions sur la biodiversité. Il y a en premier lieu les cinq menaces qui sont à la fois globales, majeures et font l'objet d'un large consensus. On y trouve la destruction des habitats, la surexploitation des ressources biologiques, les invasions biologiques, les changements climatiques, ainsi que la pollution par les contaminants.

La destruction des habitats, parfois pudiquement appelée « changement d'utilisation des sols ou des terres », est considérée comme la principale menace pour la biodiversité terrestre. Incarnée par la destruction continue de parts croissantes d'écosystèmes forestiers et steppiques, cette menace affecte également de manière importante de nombreux autres types d'écosystèmes semi-aquatiques tels que les mangroves ou les milieux humides, sans oublier certains écosystèmes marins comme les récifs coralliens.

La surexploitation affecte plusieurs écosystèmes, en particulier les ressources halieutiques marines : une majorité des grandes zones de pêche abrite actuellement des stocks fortement réduits, incompatibles avec le taux d'extraction qui prévaut. Les invasions biologiques sont parfois considérées comme la seconde cause de perte de biodiversité, avant la surexploitation, mais ceci ne semble pas appuyé sur des études quantitatives concrètes.

Les invasions concernent toutefois tous les écosystèmes et affectent significativement la plupart des groupes taxonomiques et fonctionnels. En plus d'une perte de biodiversité, ils sont responsables de son homogénéisation croissante à l'échelle globale.

Les travaux sur l'impact des changements climatiques sur la biodiversité sont actuellement en plein essor, avec un effort particulier de quantification. Cependant, les modélisations restent encore entachées d'une trop forte variabilité, faute de standardisation, pour permettre des projections fines ou d'en appréhender concrètement les effets.

Les pollutions et contaminations ont parfois joué un rôle majeur dans la dégradation des chaînes alimentaires, modifiant fondamentalement la composition de certaines communautés écologiques (p. ex. les pesticides organochlorés dans les années 1950–1970). De nouvelles molécules et substances synthétiques sont régulièrement mises sur le marché, ce qui pose, de l'avis des scientifiques, la question de l'évaluation de leur incidence à long terme sur la biodiversité, même si les procédures d'évaluation des risques associés à ces molécules ont été améliorées au cours des dernières années. Des travaux récents conduisent notamment à s'interroger sur les risques que peuvent faire courir à la biodiversité des insectes, et en particulier à celle des pollinisateurs (abeilles, boudons), les insecticides néonicotinoïdes qui appartiennent à une nouvelle classe de molécules développée au cours des 30 dernières années et qui sont utilisés à grande échelle. De telles études peuvent

faire l'objet de polémiques entre certains scientifiques et industriels, mais il est important qu'elles puissent être menées pour améliorer les conditions d'emploi de ces insecticides et en réduire l'incidence sur la biodiversité non cible. Les travaux sur les effets de la pollution ont récemment changé de problématique et d'approches, avec notamment la mise en exergue de certaines contaminations à dose faibles, mais sur des durées importantes, de molécules rémanentes ou à très longue durée de vie ou bien de l'effet cocktail de certaines combinaisons de contaminants.

Outre ces cinq grands types de pressions, il en existe un deuxième type, qui regroupe des pressions plus spécifiques, bien que leurs effets puissent aussi avoir des répercussions globales. Ces pressions, dont la littérature scientifique se fait largement moins l'écho, parce qu'elles sont naissantes ou qu'elles sont sous-estimées du point de vue de leur impact, incluent par exemple les acquisitions internationales massives de

territoires – notamment à des fins de production agricole ou énergétique – l'accroissement du déni de perte de biodiversité ou encore les maladies émergentes.

Les risques associés à ces pressions sont en premier lieu une perte irrémédiable d'une partie de la biodiversité. Cette perte peut se mesurer en termes directs, par la disparition ou la dégradation de certains écosystèmes, l'extinction de certaines espèces ou la disparition immédiate de certaines populations et de leurs gènes spécifiques, ce qui grève le potentiel adaptatif de l'espèce dans son ensemble face aux changements environnementaux. Cette perte se mesure également indirectement, via le lien entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes d'une part, et entre biodiversité et services écosystémiques d'autre part. Ces liens peuvent d'ailleurs être la cause, par effet de cascade, de pertes supplémentaires de diversité biologique.

PROSPECTIVE

> DOCUMENTER

Priorité 3.1 : Mieux documenter la biodiversité

Il semble en premier lieu essentiel de mieux documenter la biodiversité elle-même. En effet, mis à part pour quelques groupes taxonomiques comme les vertébrés supérieurs terrestres, celle-ci demeure encore largement inconnue (en particulier, mais pas seulement, sur les planchers et dans les fosses océaniques). Toutefois, la tâche est immense étant donné que l'on a décrit moins de 2 millions d'espèces parmi les 15 à 100 millions qui existeraient sur terre. La description du vivant a récemment changé d'échelle en matière de capacité d'exploration et d'identification de la biodiversité, notamment via des techniques particulièrement efficaces (ex. barcoding, génomique environnementale via le séquençage haut débit, analyse des pollens aéroportés). Ce besoin de description ne doit pas pour autant servir d'argumentation pour retarder l'action de conservation de cette biodiversité, car les espèces disparaissent actuellement plus rapidement que l'on ne peut les identifier. C'est la raison pour laquelle la définition d'indicateurs peu nombreux, mais fiables, ainsi que le recours aux concepts d'espèce parapluie ou clef de voûte sont cruciaux.

Priorité 3.2: Documenter et quantifier les différentes pressions et en hiérarchiser les effets

Il semble ensuite essentiel de quantifier et donc de hiérarchiser l'effet des grands types de pression sur la biodiversité. Pourtant primordiales, les lacunes au niveau de cette hiérarchisation sont surprenantes lorsque l'on pense aux enjeux : seule une telle hiérarchisation peut en effet guider efficacement l'action politique. Dans une phase ultérieure, il serait également essentiel de mieux caractériser les effets des différents types de pression sur chaque niveau écologique, de

la génétique et la physiologie des individus, au fonctionnement des populations, des communautés et des écosystèmes. Pour ce faire, il est nécessaire d'établir au préalable quels sont les types de biodiversité qui sont atteints par les différents facteurs de pression incriminés (spécifique, intraspécifique, fonctionnelle, écosystémique, etc.) et comment ceux-ci s'articulent. Un aspect essentiel de ce point de vue est la prise en compte des interactions entre les différents facteurs de perte de la biodiversité. Ici, les approches descriptives demeurent souvent insuffisantes et seules l'expérimentation et la modélisation peuvent permettre de progresser, ce qui implique des lourdeurs certaines. Ceci explique qu'il y ait si peu d'études dans ce domaine, avec une impossibilité en l'état d'articuler des généralisations. On pourra illustrer ce point en remarquant que le dogme d'une synergie entre changements climatiques et invasions biologiques (il a été prédit que les espèces invasives bénéficieront des changements climatiques et que les invasions vont donc s'intensifier dans les prochaines décennies) n'a jamais été démontré, et que quelques études récentes suggèrent même le contraire.

L'analyse et la quantification des grands types de pressions déjà décrites doit être complétée par l'étude d'autres pressions et risques encore peu décrits, tels que :

- des risques nouvellement identifiés, notamment à des échelles spatiales et temporelles plus réduites ou encore des pressions liées à de nouveaux usages possibles,
- l'étude des pollutions (chimiques, sonores, lumineuses), de leurs effets cumulés et des effets d'expositions longues à de faibles doses.

Priorité 3.3: Évaluer la pertinence et les limites de métriques permettant la comparaison de quantifications d'impacts

La quantification de l'effet individuel ou synergique des différentes pressions sur la biodiversité doit s'accompagner d'une quantification des impacts directs ou indirects de ces pressions sur les activités socio-économiques. Cette quantification concerne d'une part les atteintes aux services que les sociétés humaines retirent de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes et d'autre part, le coût des opérations de protection, mitigation, compensation, réhabilitations qui sont menées pour répondre à ces atteintes.

Il serait de ce point de vue capital de réfléchir aux possibilités de mises au point d'un système de

standardisation des quantifications d'impacts; en d'autres termes il convient d'évaluer la pertinence et les limites des métriques permettant la comparaison de quantifications d'impacts. Parallèlement, la notion de risque, qui correspond à la fois au produit d'un aléa par son coût et au produit de la probabilité d'occurrence d'un événement par l'ampleur de l'impact de cet événement, doit être explicitée car elle est essentielle tant pour les citoyens que pour les décideurs. Il faut en effet construire un cadre d'action qui permette aux chercheurs, gestionnaires et décideurs de 1) caractériser plus clairement et plus objectivement; 2) comparer et prioriser (localement ou globalement); et 3) communiquer et convaincre. Ceci implique tout d'abord de bien comprendre les mécanismes à l'œuvre.

> COMPRENDRE

Priorité 3.4: Mieux comprendre le fonctionnement de la biodiversité pour mieux évaluer l'incidence des différentes pressions

En premier lieu, il semble essentiel de bien appréhender comment la biodiversité est affectée par ces différentes pressions. S'il semble trivial de souligner qu'une meilleure compréhension de la biodiversité, du fonctionnement de ses composantes jusqu'à ses « productions » (ressources, services...) est un préalable nécessaire, on peut également considérer que l'étude du dysfonctionnement d'un système est généralement décisif pour la compréhension de son fonctionnement. En cela, la compréhension des pressions qui s'exercent sur la biodiversité et des risques qu'encourent la biodiversité, les écosystèmes et les sociétés humaines peut être vue comme une contribution à la compréhension de la biodiversité et du fonctionnement des éléments qui la constituent. Ce point se rapproche de la notion de diagnostic, qui reste centrale mais encore trop peu systématisée en biologie de la conservation.

Priorité 3.5: Mieux comprendre les réponses de la biodiversité aux pressions

Au nombre des éléments essentiels à cette compréhension se situe un certain nombre de questions clés. Quelle part de la biodiversité va s'adapter et quelle part va disparaître selon des grands types de pression ? Quel est le potentiel des changements évolutifs (p. ex. sélection, plasticité phénotypique) dans les différents groupes taxonomiques et fonctionnels ? Quelles sont

les conséquences des changements de distribution ou de dynamique des populations (p. ex. déclin, extinction) sur la structure et le fonctionnement des communautés ? Notamment, quelle peut être la part des extinctions en chaîne dans l'appauvrissement de la biodiversité ? Quels processus biologiques et écologiques sont susceptibles de mitiger ou au contraire d'exacerber les atteintes à la biodiversité ? Quelles sont les attentes sociales sur les questions de responsabilité environnementale, de préjudice écologique et de mesures de compensation ?

Plusieurs de ces questions ont été abordées dans le cadre du groupe de travail « Réponses et adaptation » du conseil scientifique de la FRB et on pourra se reporter à l'axe 5 « Réponses et adaptation » pour en lire la synthèse.

Priorité 3.6: Développer les recherches en sciences sociales pour appréhender, entre autres, le risque constitué par le déni de perte de biodiversité

La caractère indirect et différé de l'incidence des pertes de biodiversité sur la vie quotidienne d'une large fraction des citoyens de la planète favorise l'existence d'un déni de perte de biodiversité, un phénomène déjà observé avec le changement climatique et qui devrait s'accroître à mesure que les données scientifiques seront de plus en plus nombreuses pour étayer ces pertes. Un tel déni ne peut que freiner la mise en place de mesures visant à freiner les pertes de biodiversité.

> MODÉLISER ET SCÉNARISER

Priorité 3.7: Modéliser les conséquences des pressions au niveau écologique

La documentation et la compréhension des niveaux et types de pressions sur la biodiversité devraient permettre d'en modéliser les conséquences au niveau écologique et d'en scénariser les différents risques potentiels, en tout premier lieu concernant les pertes pour la biodiversité.

Priorité 3.8: Modéliser l'impact des pertes de biodiversité sur différents aspects du fonctionnement des communautés et des écosystèmes (et par extension l'impact sur les services)

Il est essentiel de modéliser l'impact des pertes de biodiversité sur différents aspects du fonctionnement des communautés et des écosystèmes (interactions pluri-spécifiques, production primaire, cycle des éléments nutritifs, décomposition, etc.). La modélisation devra également porter sur les services écosystémiques – qui sont des fonctionnalités ayant des implications directes pour la société et l'économie (purification de l'eau, pollinisation, régulation du climat, protection contre les maladies et les ravageurs, etc.), notamment en regard des limites biosphériques, aucune des ressources procurées par la planète n'étant inépuisable. Les aspects liés à la limitation de ces ressources ne devraient de surcroît pas être considérés seulement dans leur dimension globale, mais également dans leur dimension régionale sinon locale (facteur d'échelle). Si la modélisation devra nécessairement se focaliser en priorité sur les aspects mécanistiques, elle gagnerait

cependant à intégrer des aspects quantitatifs, notamment pour la dynamique, car ceci ouvrirait la porte à des recommandations de gestion circonstanciées, avec définition de valeurs seuils. Les nouveaux défis de prédictions de la dynamique de la biodiversité imposés par les changements globaux, et en particulier les changements climatiques, sont à cet égard une bonne illustration.

Priorité 3.9: Modéliser et scénariser les effets des politiques publiques, des programmes de conservation et des mesures de gestion de la biodiversité

Les approches de modélisation permettront à terme de scénariser non seulement les impacts du déclin de la biodiversité, mais également de mesurer les effets des opérations de mitigation, des programmes de conservation et de restauration afin d'en affiner les stratégies pour une meilleure gestion environnementale dans le futur. De manière similaire, il apparaît nécessaire de pouvoir scénariser les risques associés à une orientation inadaptée des politiques publiques et à une évaluation insuffisante de leurs impacts (effets non intentionnels).

La modélisation devra distinguer clairement entre facteurs proximaux (réaction de cause à effet dans une chaîne proche) et facteurs distaux (ou ultimes ; soit les macro-phénomènes situés à l'extrême amont qui induisent ces changements), car ici aussi l'enjeu est l'efficacité de la gestion des problèmes environnementaux.



ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

Un vaste champ de recherche est consacré à l'étude des principaux changements globaux qui exercent une pression sur la biodiversité (voir axe « Pressions et risques »). Les processus de réponses et les capacités d'adaptation de la biodiversité aux changements globaux sont mal connues et restent insuffisamment prises en compte dans les démarches de scénarisation visant à mieux anticiper le devenir de la biodiversité. Un état des lieux des connaissances sur les cinq grands mécanismes de flexibilité qui déterminent les réponses et adaptations de la biodiversité aux changements globaux est présenté ci-dessous.

1) La plasticité phénotypique (capacité des individus ou espèces à modifier rapidement leur phénotype en réponse aux variations environnementales) est un mécanisme majeur de flexibilité. Les connaissances actuelles laissent penser que des individus ou espèces qui présentent une forte plasticité pour certains fonctionnements physiologiques (donc plus « généralistes ») ont une plus grande chance de survie quand le milieu change. Mais c'est un mécanisme qui comporte aussi des limites. La prise en compte de la plasticité dans les modèles d'adaptation peut aboutir à modifier les prédictions, notamment concernant l'évolution des niches écologiques. La plasticité phénotypique est aussi un caractère déterminé génétiquement, héritable et donc potentiellement soumis à évolution. La plasticité peut donc à la fois tamponner les effets du changement climatique, mais aussi accélérer ou limiter l'adaptation génétique des organismes à ces mêmes changements.

2) L'évolution génétique est aussi un mécanisme majeur de flexibilité. Au sein de chaque espèce, il existe une variation génétique et donc une possibilité d'évolution pour des caractères de toutes natures, qu'ils soient morphologiques, biochimiques, physiologiques ou comportementaux. Une adaptation provient d'une modification (due au hasard) du génome d'un individu, qui procure un avantage pour la survie ou la reproduction. L'adaptation dans un environnement devenu défavorable est une course entre déclin démographique et évolution génétique : un variant génétique permettant de persister dans des conditions nouvelles doit atteindre une forte fréquence dans la population avant que celle-ci ne s'éteigne.

Des informations démographiques (taille de la population, vitesse du déclin ou du changement environnemental, traits de vie des organismes) doivent être combinées avec des informations génétiques pour évaluer le potentiel d'adaptation d'une population dans le contexte de stress environnementaux forts. Différents modèles démo-génétiques prédisent que plus l'effectif d'une population est élevée, plus sa diversité génétique est grande et plus son potentiel adaptatif est important (car plus grande est la probabilité d'existence et de sélection d'un variant qui permettra à ses porteurs de s'adapter). Un défi majeur est donc de préserver au mieux la source de flexibilité que constitue la variation génétique des espèces dans un contexte de changements globaux qui tendent à déplacer, fragmenter ou réduire leur aire de répartition.

3) La migration (déplacement des individus ou dispersion des propagules dans l'espace) permet aux populations d'échapper à des conditions environnementales locales détériorées et de coloniser des espaces où ces conditions deviennent favorables. Dans le contexte de changements rapides, la migration apparaît comme une adaptation clé. Les déplacements d'aire, avec des remontées d'espèces en altitude et en latitude dans l'hémisphère Nord figurent parmi les réponses de la biodiversité au réchauffement climatique les mieux documentées. Si les déplacements constatés vont dans le sens du déplacement des niches climatiques prédit par les modèles sur la base de différents scénarios climatiques, la question des vitesses relatives de ces déplacements reste une grande inconnue : les espèces ont-elles toutes les capacités à se déplacer suffisamment vite pour suivre le déplacement de leurs zones climatiques optimales ? Les scénarios de bio-

diversité incorporent encore rarement une description explicite des capacités de migration. Ils confrontent le plus souvent des scénarios où la répartition de chaque espèce suit instantanément le déplacement de sa niche écologique, à des scénarios où celle-ci est restreinte aux zones favorables précédemment occupées (pas de colonisation).

La migration joue également un rôle clé dans un contexte de fragmentation des paysages. Elle permet la cohésion génétique et démographique d'une espèce en connectant ses différentes populations : les flux de gènes entre populations sont cruciaux. La prise en compte de la migration et des flux de gènes associés est essentielle pour comprendre les contraintes et les modalités de l'évolution génétique comme source d'adaptation aux changements globaux.

4) Le réarrangement des communautés est une quatrième forme de réponse aux changements globaux. Certaines espèces possèdent des caractéristiques leur permettant de répondre aux changements climatiques et aux changements d'habitats plus rapidement que d'autres. Ainsi, les perturbations induites par les changements globaux exercent des filtres sur des espèces ayant certaines stratégies écologiques, certains traits fonctionnels ou appartenant à certaines lignées. Les changements globaux « réarrangent » les assemblages ou « communautés » d'espèces : la présence et l'abondance des espèces possédant les caractéristiques permettant de faire face aux changements globaux augmentent progressivement au détriment des autres espèces. Par exemple, les espèces spécialistes étant plus vulnérables à des modifications de leur environnement que les espèces généralistes, mesurer le degré de spécialisation des communautés permet de quantifier la réponse possible des communautés à des changements climatiques ou paysagers.

Une réorganisation des assemblages d'espèces en faveur d'espèces possédant certaines caractéristiques (fonctionnelles, écologiques, évolutives) favorisées par les changements globaux a pu être quantifiée pour plusieurs groupes, dans plusieurs systèmes et à plusieurs échelles. Ces réorganisations sont susceptibles de modifier les interactions entre les groupes, mais la vitesse, la flexibilité et les conséquences de cette réorganisation demeurent peu connues. Ces champs de recherche sont très actifs, et nécessaires pour mieux décrire et comprendre la réponse des communautés aux changements globaux.

5) Les changements de pratiques et de savoirs au sein des sociétés humaines représentent un autre mécanisme de flexibilité qui interagit avec la dynamique

de la biodiversité et des services écosystémiques à différentes échelles. L'impact des changements globaux sur les sociétés est considérable, à la fois en tant qu'ils affectent la biodiversité dont les sociétés dépendent, et parce qu'ils influencent en retour les modes d'exploitation et de gestion des ressources naturelles mis en place par chaque système social.

La notion de « résilience », abondamment utilisée pour décrire les réponses des sociétés humaines confrontées à des changements environnementaux, met en avant la capacité de celles-ci à faire face aux transformations sans pour autant se « désintégrer ». Autrement dit, les sociétés feraient appel à leur capacité d'adaptation pour absorber les effets des fluctuations environnementales et/ou socio-économiques. Toutefois les démonstrations de résilience ne doivent pas masquer le caractère souvent précaire des défenses mises en œuvre face à des mutations particulièrement intenses.

Les réponses des sociétés aux changements globaux dépendent de la façon dont les individus et les groupes se représentent la nature et la valorisent, et reposent sur différents processus. Face au changement, les sociétés mobilisent des savoirs reconfigurés, qui résultent du dialogue permanent entre transmissions et acquisitions, à l'échelle de l'individu et de la société. L'innovation, sous toutes ses formes, constitue aussi un important levier d'adaptation. Elle permet par exemple à certaines populations de tirer parti des nouvelles opportunités, comme l'insertion dans des marchés mondialisés. L'innovation technologique est une réponse qui permet souvent de maintenir le niveau d'exploitation des ressources face à une dégradation environnementale, mais parfois au détriment de la biodiversité et de la dynamique à long terme des écosystèmes.

D'où l'importance accordée à la notion de risque et à la question des effets de seuils susceptibles d'entraîner des ruptures quand le système atteint ses limites. Par exemple, dans les situations les plus critiques, le basculement du système est susceptible d'engendrer le départ des populations (exode rural, migrations internationales), la migration pouvant être envisagée comme la stratégie adaptative ultime face à la dégradation des conditions environnementales. La gestion des risques constitue un élément important des politiques publiques d'adaptation aux changements globaux. Les politiques publiques peuvent être de puissants outils d'incitation, de régulation et d'encadrement, susceptibles d'orienter les réponses des sociétés dans une direction planifiée, en vue de concilier a priori les besoins humains et la protection de la biodiversité.

> DOCUMENTER

L'étude des réponses des organismes, des écosystèmes et des sociétés aux changements globaux, à travers les mécanismes de flexibilité décrits, nécessite de pouvoir caractériser et quantifier les dynamiques temporelles et spatiales à l'œuvre, ainsi que l'ampleur des réponses aux changements globaux (par exemple pour les déplacements d'espèces et les changements de composition des communautés) et les effets relatifs de différentes pressions (voir axe « Pressions et risques »). Décrire les phénomènes et leurs dynamiques, développer des indicateurs, des modèles et des scénarios permettant de croiser différentes dimensions suppose de pouvoir disposer de jeux de données importants. Il est donc essentiel de renforcer l'acquisition et la disponibilité des données (voir axe « Systèmes d'information »). Un besoin particulier se fait sentir en ce qui concerne les données de suivi dans

le temps, afin d'étudier les dynamiques écologiques sur le long-terme et la dynamique des réseaux d'interactions, en prenant mieux en compte les effets des changements globaux. Afin de renforcer la disponibilité de données de suivi à long-terme, il convient de poursuivre les efforts de mise en cohérence et de pérennisation des systèmes d'observation de la biodiversité, en veillant à mieux prendre en compte les processus adaptatifs, notamment les vitesses et intensités des réponses aux pressions de changement. Il sera aussi crucial d'assurer une réelle traçabilité de l'information sur les pratiques humaines mises en œuvre pour faire face aux changements globaux. Des programmes de science participative pourraient s'avérer utiles, à condition de tenir compte de leurs limites statistiques inhérentes.

> COMPRENDRE

Premièrement, l'étude des réponses et de l'adaptation aux changements globaux implique de s'attacher à dépasser la description de patrons pour aller vers celle de processus. Comprendre comment les sources de flexibilité peuvent atténuer (ou non) les conséquences négatives des changements globaux sur la biodiversité et les sociétés qui en dépendent nécessite d'en comprendre les mécanismes.

Deuxièmement, il est essentiel d'étudier les couplages entre les différentes sources de flexibilité, afin d'identifier leurs rôles relatifs, leurs interactions et leurs rétroactions à différentes échelles de temps et dans l'espace.

Priorité 4.1 : Comprendre les processus de l'adaptation

a) Comprendre les réponses plastiques aux changements globaux et leurs limites

Les mécanismes de la plasticité phénotypique doivent être étudiés en détails, en partant de l'échelle moléculaire, pour déterminer la chaîne des processus qui relie les stimuli environnementaux, l'information génétique et les variations de phénotype de traits fonctionnels clés dans l'adaptation aux changements climatiques et aux changements environnementaux qui leur sont associés (c'est-à-dire qui peuvent présenter un caractère adaptatif du fait de leur fort impact sur la valeur sélective).

Le rôle de la plasticité phénotypique a surtout été mis en avant dans la réponse des organismes aux changements climatiques. Le rôle de la plasticité phénotypique en réponse à d'autres composantes du changement global telles que la pollution, la surexploitation ou le changement d'usage des terres a vraisemblablement été sous-estimé. Discriminer entre ces

mécanismes est crucial, en ce qu'ils impliquent des leviers très différents sur ces réponses et des points de rupture distincts.

b) Comprendre les mécanismes de l'évolution génétique

Comprendre comment les changements globaux modifient les patrons de sélection naturelle, et ses cibles, est un enjeu majeur qui se heurte à des nombreuses difficultés méthodologiques. Nous sommes encore loin de bien saisir les mécanismes fins de ces phénomènes sélectifs, afin de pouvoir projeter dans le futur leur évolution. Renseigner les liens entre variation moléculaire, patrons d'expression génique, traits phénotypiques et composantes de la valeur sélective reste un défi impliquant de mobiliser en parallèle des technologies de pointe de biologie moléculaire, de l'analyse de l'architecture génétique des caractères et des études démographiques en populations naturelles.

Certaines espèces ou populations échouent à s'adapter à des conditions écologiques nouvelles par manque de variabilité génétique pour des traits critiques dans ce nouvel environnement (phénomène de « génostase », Bradshaw 1991). Mesurer la variabilité génétique pour des traits identifiés comme cibles de la sélection dans les environnements modifiés par l'homme est donc un objectif important pour appréhender les limites du potentiel d'adaptation. Si les apports de la génomique environnementale permettent d'imaginer dans le futur un saut quantitatif de notre compréhension de la distribution de la variabilité génétique, les approches de génétique quantitative plus traditionnelles fondées sur l'analyse de pedigrees demeurent efficaces. Il convient de mieux intégrer ces deux approches pour prendre en compte la nature complexe du déterminisme géné-

tique de nombreux traits écologiques. Il sera important aussi de déterminer si les corrélations génétiques entre traits peuvent ralentir la réponse des populations à la sélection.

Qu'est-ce qui, *in fine*, explique les variations de diversité pour des traits écologiques majeurs ? Si les patrons de diversité neutre ont été beaucoup étudiés (et la diversité « neutres » aujourd'hui peut s'avérer adaptative dans un nouveau contexte), cette question reste ouverte en ce qui concerne la diversité sélectionnée. On manque ici d'un corpus de données suffisant pour avoir une vision générale des rôles relatifs des flux de gènes et plus généralement de la démographie ou de l'histoire des populations, sur la variabilité pour des traits écologiques clés. Il faut progresser dans la compréhension des contraintes à l'évolutivité de certains caractères, en particulier au niveau moléculaire. Le rapprochement de patrons macro-évolutifs et de la microévolution contemporaine pourrait permettre d'identifier des prédicteurs du potentiel évolutif à différentes échelles taxonomiques.

c) Comprendre ce qui organise la variation des capacités migratoires

Les capacités d'expansion géographique et l'échelle spatiale des flux de gènes, à la fois observées et prédites, sont extrêmement variables. Pour mieux comprendre les facteurs organisant cette diversité, il faut accéder aux mécanismes expliquant la variation des capacités de migration, en distinguant la part des facteurs intrinsèques (traits biologiques des espèces) et extrinsèques (facteurs abiotiques comme les conditions météorologiques ou facteurs biotiques, dont les agents de dispersion). En l'absence d'indicateurs fiables des capacités de dispersion pour une large fraction de la biodiversité, des approches novatrices couplant des informations hétérogènes à grande échelle spatiale devront être développées pour mieux mesurer les capacités de dispersion des individus et de leurs gènes. Progresser dans la description et la modélisation de la migration implique également d'explorer les notions de réseaux ou de cartes de connectivité. Les mécanismes de flexibilité de la migration elle-même devront être plus explicitement pris en compte. L'objectif serait d'arriver à une compréhension plus fine des barrières à la migration, incorporant plus d'information sur la biologie de la dispersion des espèces ou groupes d'espèces d'intérêt.

d) Comprendre la dynamique des communautés : mécanismes et effets des nouveaux assemblages d'espèces

Un des grands enjeux de l'étude des changements globaux consiste à augmenter notre capacité de prédiction de la composition des communautés impactées. Les changements globaux devraient induire la formation d'assemblages d'espèces inédits (Hobbs *et al.* 2009 ; Lavergne *et al.* 2010), ce qui soulève des

questions sur les mécanismes d'assemblages de ces nouvelles communautés. Comprendre l'impact des changements globaux sur la biodiversité exige d'avoir une compréhension à la fois des dynamiques de l'évolution et de celle de l'écologie des communautés (Lavergne *et al.* 2010 ; Vellend 2010). Par exemple, mesurer et tester la structure phylogénétique des communautés ainsi que les traits des espèces (Webb, 2002) permet théoriquement d'étudier l'effet relatif de filtres environnementaux, de processus historiques et des interactions entre espèces. Une piste prometteuse consisterait à favoriser les analyses quasi-expérimentales contrastant des zones ayant subi différentes pressions (par exemple les aires protégées versus non protégées, ayant subi des événements climatiques extrêmes ou non, plus ou moins urbanisées récemment etc.).

Changement climatique et changements d'habitats agissent à des échelles spatiales différentes, mais simultanément, sur les communautés d'espèces (Barnagaud *et al.* 2012). L'étude conjointe des impacts de ces deux pressions est nécessaire pour mieux comprendre la réorganisation des communautés. Une piste prometteuse pour développer cette recherche consiste à s'intéresser davantage à la dynamique temporelle des communautés, en relation avec la dynamique temporelle des paysages et du climat, pour mieux comprendre leur stabilité, leur résilience ou leur temps de réponse à plus ou moins longs termes.

Peu de résultats théoriques sont actuellement disponibles pour évaluer les effets des interactions entre espèces sur le maintien de la diversité. On connaît mal la structure des « réseaux de réseaux », c'est-à-dire des réseaux qui comprennent des interactions entre espèces aussi bien mutualistes qu'antagonistes. Un nouveau cadre théorique est vraisemblablement nécessaire pour décrire cette complexité. La description de ces systèmes constituera une première étape, devant déboucher sur l'identification des facteurs qui expliquent les structures mises en évidence, leur résilience dans le contexte des changements globaux et enfin l'identification des facteurs ou processus qui peuvent être négligés ou non à certaines échelles temporelles et spatiales.

Prédire le fonctionnement des assemblages d'espèces inédits dans les communautés impactées par les changements globaux est un défi de recherche majeur. Ce projet implique de dépasser les questionnements autour des relations diversité-fonctionnement pour prendre en compte (i) les interactions nouvelles ou perturbées entre espèces, (ii) le fait que les espèces résilientes à différentes composantes du changement global ne sont pas nécessairement un échantillon aléatoire des espèces dans les communautés non impactées. Les bases de données sur les traits fonctionnels d'un grand nombre d'espèces peuvent per-

mettre d'avancer sur ces questions, en couplant des approches descriptives à des approches théoriques nouvelles explorant les relations entre fonctionnement et composition des communautés.

e) Comprendre les réponses des sociétés aux changements globaux

Les sociétés sont confrontées aux impacts des changements globaux sur la biodiversité, les services écosystémiques associés et sur les ressources qu'elles utilisent. Que ce soit de façon réactive ou préventive, spontanée ou planifiée, individuelle ou collective, les individus et les groupes humains n'ont d'autre choix que de répondre aux changements. Il est essentiel de comprendre les processus d'adaptation ou d'inaadaptation des sociétés à ces changements, vis-à-vis de la biodiversité.

Les réponses des sociétés aux changements globaux dépendent de la façon dont les individus et les groupes se représentent la nature et la valorisent. Ces réponses influencent en retour les représentations sociales ; ces processus posent la question d'une co-dynamique entre actions et représentations dans le champ de la biodiversité. Des travaux en philosophie de l'environnement, en anthropologie de la nature, en psychologie environnementale et en économie doivent être poursuivis et développés. Des programmes interdisciplinaires permettant de mettre en dialogue ces différentes approches disciplinaires seront un atout inestimable pour mieux comprendre l'adaptation des sociétés aux changements globaux ou pour mettre en évidence les freins et les limites à cette adaptation.

Une attention particulière devrait être portée aux mécanismes d'appréhension des changements, à la façon dont circulent les informations et les savoirs entre les sphères scientifiques, sociales et politiques. L'importance des savoirs locaux, la place des lanceurs d'alerte et de la production d'expertise par la société civile dans le contexte militant sont autant de champs à explorer, d'un point de vue épistémologique, anthropologique et sociologique. Les sociétés mobilisent des savoirs anciens formant un fond collectif et innovent à travers l'expérimentation. Il est important de travailler sur les hybridations et les échanges entre savoirs locaux ou vernaculaires et scientifiques (Collignon 2005). Quels sont les processus d'apprentissage ? Comment s'opèrent les transmissions verticales, trans-générationnelles, versus les transmissions horizontales ? Quels sont les processus et les acteurs impliqués dans la transformation d'une innovation individuelle en un savoir collectif partagé ?

Enfin, les changements affectent différemment les individus et les groupes, faisant émerger de nouveaux enjeux, qui se superposent souvent à différentes formes d'inégalités politiques et socio-économiques. Pour appréhender et pour favoriser l'adaptation des sociétés aux changements environnementaux, il est

donc nécessaire de repenser les notions de justice et de solidarité, tant du point de vue philosophique que du point de vue politique et juridique.

A cet égard, comprendre la pluralité des réponses institutionnelles aux changements de biodiversité constitue un champ de recherche important. Les objectifs des stratégies adoptées reposent-ils sur des principes (responsabilité, précaution, normes minimales) ou sur une approche utilitariste ? Quels facteurs orientent les pouvoirs publics et les institutions vers des approches réglementaires ou vers des approches incitatives ?

Priorité 4.2: Étudier le couplage entre sources de flexibilité

a) Comprendre le rôle relatif et les interactions entre les sources de flexibilité à différentes échelles de temps et d'espace

Les différentes sources de flexibilité jouent un rôle différent dans la réponse aux changements globaux selon l'échelle de temps ou d'espace considérée. Or, les échelles de temps où les changements de pratiques des sociétés ont été étudiés sont radicalement différentes des échelles de temps des projections de changements de distribution de la biodiversité liés au changement climatique. Les problématiques liées aux échelles d'espace sont également cruciales : le déplacement des aires de répartition a des conséquences très différentes selon que l'on s'intéresse à la conservation de la biodiversité à une échelle très locale ou globale. Les mécanismes évolutifs sont principalement décrits comme intervenants à de grandes échelles temporelles (climatiques ou géologiques), tandis que les processus écologiques sont généralement interprétés sur des échelles temporelles et spatiales courtes, en supposant que l'évolution des processus peut être ignorée. Des choix s'imposent devant l'ampleur de la complexité, même si les différences entre échelles ne sont pas toujours si nettes. Une question importante concerne donc la hiérarchisation des processus que l'on pourrait négliger et celle des échelles temporelles et spatiales à considérer. Mieux comprendre comment les différents mécanismes de flexibilité s'articulent entre eux à différentes échelles de temps et d'espace est une étape critique pour pouvoir intégrer de façon pertinente ces réponses dans différents scénarios de biodiversité.

Les principaux fronts de recherche actuels s'intéressent aux interactions entre les différentes sources de flexibilité, historiquement étudiées séparément et souvent par des disciplines différentes. La nécessité de les intégrer constitue une priorité forte, qui implique de comprendre comment elles s'influencent mutuellement. Il est donc pertinent de développer des problématiques de recherche autour de ces interactions, entre tous les niveaux de flexibilité des socio-écosystèmes (voir tableau).

b) Décrire les boucles de rétroactions et l'impact des pratiques de gestion

L'existence d'interactions fortes entre les différents mécanismes de flexibilité des socio-écosystèmes implique l'existence de boucles de rétroaction entre différentes composantes de ces systèmes. La compréhension et la description de ces boucles de rétroaction est critique pour expliquer les points de basculement du fonctionnement de ces systèmes complexes, les phénomènes d'hystérésis et d'irréversibilité des changements environnementaux, les spirales de dégradation comme les spirales « vertueuses » permettant de restaurer un fonctionnement plus harmonieux.

Les pratiques de gestion des écosystèmes (agriculture, sylviculture, pêche, etc.) et d'aménagement des territoires ont des impacts directs et indirects multiples sur les différents mécanismes de flexibilité qui restent souvent mal connus et peu ou pas quantifiés. Ces impacts multiples ne sont pas indépendants entre eux et l'effet des pratiques sur la biodiversité résulte parfois d'interactions complexes entre mécanismes de flexibilité qui peuvent opérer à différentes échelles spatiales et temporelles. Comprendre ces interactions permettra le développement d'approches intégratives, notamment par modélisation, pour proposer des scénarios d'impact des pratiques actuelles ou proposer des pratiques innovantes.

Effet de	Plasticité Phénotypique	Évolution génétique	Migration	Réarrangements des communautés	Changements des pratiques et savoirs
Sur					
Plasticité Phénotypique		Évolution de la plasticité	Sélection sur la plasticité	Normes de réaction affectées par la présence d'autres espèces	Manipulation du phénotype via les conditions environnementales (e.g. irrigation)
Evolution génétique	Force de la sélection		Adaptation locale Maintien diversité génétique	Force et direction de la sélection	Gestion des ressources génétiques Sélection artificielle
Migration	Plasticité de la migration	Évolution de la migration		Migration dépendante de la présence d'autres espèces (dont vecteurs de dispersion)	Migration assistée (e.g. transplantations)
Réarrangements des communautés	Augmentation de l'indice de généralisme	Évolution des interactions Effets génétiques étendus	Séparation spatiale des espèces en fonction de leurs capacités migratoires		Diversification des cultures et plus généralement mutations des agroécosystèmes
Changements des pratiques et savoirs	Ajustement des pratiques agricoles aux changements phénologiques	Efficacité des méthodes de lutte contre les pathogènes et les vecteurs (évolution de résistances)	Gestion des invasions biologiques Limites des zones de protection Déplacement des zones d'exploitation	Stratégies d'exploitation des ressources naturelles	

> MODÉLISER, SCÉNARISER

Afin de progresser dans l'intégration de l'adaptation dans les scénarios de biodiversité, trois fronts de recherche peuvent être mis en avant :

- proposer des indicateurs du potentiel d'adaptation ;
- intégrer les mécanismes de flexibilités dans l'élaboration des scénarios de biodiversité ;
- étudier les interactions entre la biodiversité et les sociétés humaines autour des enjeux liés au rôle de l'adaptation.

Priorité 4.3: Proposer des indicateurs du potentiel d'adaptation

Les réflexions ont mis en avant la nécessité de développer des indicateurs du potentiel d'adaptation, qui peuvent nous aider à faire des choix, à hiérarchiser les mécanismes, non pas sur la base d'a priori non nécessairement bien fondés, comme la séparation des échelles de temps écologiques et évolutives, mais sur la base d'informations sur le rôle relatif, la dynamique et les échelles spatiales et temporelles des différents types de réponses.

Sont à développer :

a) des indicateurs de plasticité adaptative, en ciblant les mesures sur des phénotypes impliqués dans la réponse de traits fonctionnels au changement global (p. ex. phénologie, efficacité d'utilisation de l'eau des plantes) ou connectés à la valeur sélective (p. ex. traits de croissance, investissement reproductif) ;

b) des indicateurs du potentiel évolutif, à l'appui d'une approche de la conservation visant à maintenir la capacité d'adaptation des espèces, en restant prudent quant au concept de capacité d'adaptation, sa pertinence à différentes échelles temporelles et spatiales, son efficacité à prédire le devenir des populations et des espèces, ses relations avec des mesures estimables facilement dans les populations naturelles, et sa valeur opérationnelle ;

c) des indicateurs de migration, à partir de l'analyse de bases de données sur la variation interspécifique des distances de dispersion, des flux de gènes, de la migration ou de la mobilité, qui pourraient aussi permettre de définir des groupes fonctionnels intégrant les différences migratoires ;

d) des indicateurs de résilience des communautés, qui pourraient être obtenus en testant la réponse d'indicateurs permettant de décrire plusieurs facettes (démographique, fonctionnelle, phylogénétique, écologique) de la diversité et des dynamiques des communautés, afin de mieux caractériser la flexibilité de leurs réponses (capacités de résilience, points de ruptures et d'adaptation) ;

e) des indicateurs du potentiel de résilience et d'innovation des sociétés humaines, qui permettraient d'évaluer la sensibilité et la capacité d'adaptation au sein d'un socio-écosystème face à un changement environnemental, à partir i) d'indicateurs d'état (qualité adaptative à un instant t), ii) d'indicateurs de changement (par exemple traduisant les connaissances sur l'évolution des calendriers saisonniers : dates de floraison, migration, etc.), et enfin iii) d'indicateurs du potentiel d'adaptation, reflétant la capacité des acteurs et des sociétés d'opter pour des stratégies préventives. Cela concerne également des indicateurs liés à l'approche par services, qui peut permettre aux sociétés de s'adapter à travers de nouveaux concepts et outils d'aide à la décision.

f) des indicateurs intégrés ?

Un champ de recherches relativement vierge consisterait à définir des indicateurs du potentiel adaptatif des socio-écosystèmes qui intégreraient les interactions entre les différents mécanismes de flexibilité : par exemple des indicateurs de flexibilité phénotypique qui prendraient en compte à la fois les capacités de changements génétiques et la plasticité phénotypique

ou bien des indicateurs de résilience qui prendraient en compte à la fois les changements phénotypiques au sein des espèces et les changements d'abondance de celles-ci (assurance écologique et évolutive). L'intégration de variables socio-économiques doit être explorée également.

Priorité 4.4 : Intégrer ces mécanismes de flexibilité dans les scénarios de biodiversité

La complexité croissante associée à l'intégration de différents mécanismes de flexibilité dans les réponses des socio-écosystèmes aux changements globaux rend encore plus aigus les défis liés à la modélisation et la scénarisation. Il est nécessaire d'identifier des variables permettant de faire le lien entre différents modèles et de construire des indices permettant de décrire différents aspects de la diversité, de croiser plusieurs dimensions ou sources de flexibilités et de résumer une information complexe en un indice simple.

a) Utiliser des indicateurs qui rendent compte des mécanismes clés pour orienter les choix de modélisation/scénarisation

Différents indicateurs du potentiel d'adaptation peuvent aider à hiérarchiser les mécanismes impliqués dans différents types de réponses. La meilleure compréhension de ces divers mécanismes, à travers l'utilisation d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs ciblés, peut aider à orienter les choix de modélisation, en définissant par exemple des groupes fonctionnels sur la base de l'importance des différentes sources de flexibilité, et, plus généralement, en identifiant les compromis nécessaires entre précision, généralité et réalisme à intégrer dans la construction de ces scénarios. A partir des sorties des modèles un retour sur la pertinence des indicateurs est nécessaire.

b) Défis de modélisation liés au couplage

Pour appréhender la flexibilité des socio-écosystèmes face aux changements globaux, il est nécessaire d'intégrer les différentes formes de flexibilité dans des modèles mathématiques. Deux voies peuvent être suivies. La première est de trouver des formalismes simples et génériques qui permettent de rendre compte d'une très grande variété de situations. Ces modèles théoriques (e.g Chevin *et al.* 2010) permettent une résolution analytique qui donne l'ensemble des cas envisageables. Ces modèles rendent compte des points de basculement possibles, mais ne permettent pas forcément de quantifier explicitement les seuils correspondant à ces points de basculement pour une situation écologique spécifique. Ils doivent donc être complétés par des modèles de simulations qui quantifient les sources de flexibilité pour des situations précises. Ces modèles permettront d'affiner les scénarios dans des situations écologiques pour lesquels la quantification de l'évolution des services écosysté-

miques rendus est importante (e.g plantes de grandes cultures, forêts, pêches). Le dialogue entre ces deux types d'approches est nécessaire pour préciser les scénarios de l'évolution de la biodiversité. Le couplage de modèles œuvrant à différentes échelles nécessite le développement d'outils et méthodes appropriés (plateformes de modélisation, métamodélisation, etc.)

c) Défis liés à l'intégration des boucles rétroaction dans les scénarios

Nous sommes encore loin d'intégrer les boucles de rétroactions aux scénarios de biodiversité : par exemple si la modélisation des impacts du climat sur la biodiversité prend en compte les conséquences de différents scénarios d'évolution des pratiques humaines autour de l'usage des ressources naturelles, la façon dont, en retour, ces pratiques vont être altérées par les changements de biodiversité n'est pas modélisée de façon dynamique.

d) Défis liés aux changements d'échelle

Les processus impliqués dans l'adaptation des socio-écosystèmes opèrent à des échelles de temps (p. ex. de la seconde au siècle), d'espace (du local au global) et de niveau d'organisation (p. ex. de la molécule au biome) très variées. La compréhension des mécanismes impliqués dans l'adaptation nécessite parfois d'étudier les processus à une échelle fine, notamment en physiologie ou en génétique. La non linéarité des processus et le dépassement des gammes de variations environnementales actuellement expérimentées (notamment en termes de CO₂) rendent nécessaire un programme réductionniste au cas par cas (Steel 2004). Des études faites sur certains objets écologiques bien connus (e.g les moustiques) permettent de bien comprendre toute la chaîne d'expression des phénotypes impliqués dans l'adaptation au changement global dans certaines situations particulières. Mais ce programme réductionniste prend le risque de s'éloigner des échelles d'intérêt pour les écologues et la société que sont l'écosystème et la région. Une réflexion sur les changements d'échelles spatiale et temporelle est donc nécessaire.

Dans ce contexte quatre défis paraissent majeurs :

- Premièrement, il faut mener une réflexion sur les hiérarchies d'échelles : pour chaque source de flexibilité et chaque phénotype étudié, le bon équilibre dans la description des différentes échelles doit être trouvé ;

ensuite si plusieurs échelles emboîtées doivent être prises en compte, il faut trouver les concepts et outils permettant de faire le lien entre les lois développées à ces différentes échelles.

- Deuxièmement, il existe des processus spécifiquement spatiaux comme la dispersion des propagules ou les flux latéraux de matière, dont l'étude pose des problèmes et enjeux spécifiques et requiert l'usage d'un outillage statistique particulier.
- Troisièmement, du fait de la réponse non linéaire de nombreux processus aux variations de l'environnement, tout usage de moyennes biaise potentiellement systématiquement les résultats de simulations (Davi *et al.* 2006) ; il est donc nécessaire lors de changements d'échelle (e.g de la parcelle à la région) soit de tester le caractère négligeable de ces biais soit d'utiliser des paramètres équivalents.
- Quatrièmement, le changement d'échelle requiert aussi l'usage d'outils spécifiques ; en ce qui concerne l'écologie végétale, si la télédétection semble prometteuse pour estimer à de larges échelles la phénologie (Guyon *et al.* 2011), le niveau de recouvrement du couvert (Turner *et al.* 1999) ou même la composition biochimique des feuilles (Le Maire *et al.* 2008), l'investigation des variations spatiales du sol et du sous sol pose encore plus de problèmes.

e) Défis liés à la confrontation aux données (validation)

La complexité croissante liée à l'intégration de différents mécanismes de flexibilité dans la réponse des socio-écosystèmes aux changements globaux rend encore plus aigus les défis de recherche liés à la confrontation de ces scénarios de biodiversité aux données. Cette confrontation est nécessaire à la fois pour paramétrer les modèles et aussi pour les valider. Dans cette optique, comme indiqué dans la partie documenter, il y a un besoin crucial de renforcer l'acquisition de données, mais aussi de développer des approches expérimentales pour mieux comprendre les processus en préalable à leur prise en compte dans les modèles. Le développement d'approches comparatives (notamment fondées sur des analyses phylogénétiques) est également prometteur pour à la fois informer et tester les scénarios de biodiversité.



AXE TRANSVERSAL : SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE CONNAISSANCES

Coordination et rédaction :
Thierry Bourgoïn, Denis Couvet
Contributions : Eric Garnier,
Jean-François Silvain,
Aurélië Delavaud,

ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

Outre les trois priorités majeures identifiées pour la recherche française (modélisation des changements futurs de la biodiversité, recherche sur les services écosystémiques et les valeurs, développement des bases scientifiques pour l'innovation dans le champ de la valorisation de la biodiversité), le document de prospective 2009 avait identifié deux actions prioritaires essentielles, propres à lever des verrous dans le domaine de la biodiversité : i) renforcer la connaissance des compartiments de la biodiversité les plus mal connus et, ii) renforcer et coordonner au niveau national les observatoires de la biodiversité. Le document appelait à ce que l'ensemble des données primaires issues de l'observation et l'étude de la biodiversité soit rassemblé au sein de systèmes d'informations distribués et interopérables avec pour objectifs de décrire, comprendre et anticiper la nature des changements de la biodiversité et des services écosystémiques.

Les différents éléments mis en lumière dans les axes thématiques (1 à 4) du présent document pour mieux documenter la biodiversité soulignent à nouveau l'actualité de cet enjeu. L'avancée des connaissances nécessite l'acquisition de données et leur transformation en information pertinente, qui est ensuite incorporée dans un corpus de faits, principes et théories scientifiques. Les éléments propres à favoriser des développements importants en matière de recherche peuvent être synthétisés en trois principaux ensembles :

- travailler sur les concepts, les descripteurs, les référentiels, ainsi que sur les méthodes et outils de mesure et d'évaluation de la biodiversité,
- accélérer la description de la biodiversité en s'appuyant notamment sur les nouveaux outils qui ont permis un changement d'échelle dans ce domaine,
- mobiliser de grands jeux de données pour quantifier et comprendre les dynamiques et les interactions.

Ces conclusions suggèrent que des avancées majeures pourraient être favorisées dans la recherche sur la biodiversité grâce au renforcement et à la structuration (déjà amorcés) des systèmes d'information et de connaissances sur la biodiversité.

Nous entendons par système d'information « *un ensemble organisé de ressources (matériels, logiciels, personnel, données et procédures) qui permet de collecter, regrouper, classifier, traiter et diffuser de l'information* » (De Courcy, 1992). L'enjeu de ces systèmes d'information est la **mise au service de la recherche et de l'expertise, d'un vaste corpus de données primaires fondamentales, parfois incomplètes, peu ou mal exploitées et porteuses d'informations très hétérogènes, bien qu'interconnectées**. Les systèmes de connaissances structurent eux la façon dont ces informations sont mobilisées, croisées et intégrées par différents acteurs pour produire et diffuser de nouveaux savoirs¹.

Les données informatisées sur la biodiversité sont utilisées de multiples manières : pour répondre à des questions scientifiques et sociétales précises, pour mettre en évidence des patrons/tendances insoupçonnés, pour accéder à de nouveaux niveaux de connaissances, pour préciser les modèles et améliorer les scénarios de référence, les seuils de systèmes de veilles automatisés, pour étayer des choix et les prises de décision, etc. En particulier, les systèmes d'information doivent permettre de documenter et analyser les processus potentiellement à l'œuvre dans la dynamique de la biodiversité en confrontant et en synthétisant les informations recueillies. La description des patrons, la documentation des mécanismes de réponse, d'adaptation des populations et des socio-écosystèmes, et la modélisation doivent permettre la construction de modèles et de scénarios qui eux-mêmes permettront d'éclairer les choix et les prises de décisions.

¹ Il ne s'agit pas ici des systèmes de connaissances traditionnels ou indigènes en tant que produit des interactions entre une population et son environnement au cours de son histoire.

> DISPOSITIFS ET SYSTÈMES D'INFORMATION EXISTANTS ET ÉMERGEANTS

De nombreux systèmes d'information sont gérés par la recherche française, parfois depuis de nombreuses années. Ces derniers ont fait l'objet d'un certain nombre de réorganisations et intégrations ces dernières années, à la suite des initiatives SOERE (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement) et TGIR (Très Grandes Infrastructures de Recherche telles que e-ReColNat), ainsi qu'à travers le développement du projet d'ECOSCOPE porté par la FRB, dans le cadre duquel un premier recensement des dispositifs existants a pu être réalisé.

Trois grands types de dispositifs, documentant différents types d'objets et de variables, selon différents protocoles, se déploient à plusieurs échelles territoriales :

1. **Les collections**, notamment celles du Muséum National d'Histoire Naturelle, complétées par différentes collections thématiques ou régionales se déploient sur le territoire métropolitain ou Outre-Mer. La TGIR « E-ReColNat » est le dispositif national qui assure aujourd'hui la mise en coordination de ces données. Ces collections basculent aujourd'hui leurs données dans la sphère digitale avec la constitution de bases de données de collections de spécimens, mais aussi de bases de données taxonomiques assurant le lien avec la recherche
2. **Les observatoires de recherche** et de caractérisation de la biodiversité et des ressources génétiques, parfois couplés à des dispositifs expérimentaux, sont distribués en France métropolitaine, dans les départements et communautés d'Outre-Mer ainsi que dans les pays du sud. Leurs activités sont tournées, à des fins de recherche, vers les inventaires, les suivis extensifs et dans certains cas l'utilisation d'installations expérimentales. Leurs données, agrégées dans des systèmes d'information distribués, permettent l'analyse des patrons et des processus liés à la biodiversité.

Ces dispositifs d'observation peuvent eux-mêmes être répartis en trois grands groupes :

- Les dispositifs de recherche impliquant **un suivi systématique de la biodiversité au niveau national ou sur de grandes régions**, notamment le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) dans son volet biodiversité, l'Observatoire thonier, le réseau littoral d'observation des populations phytoplanctoniques (REPHY), le réseau d'observatoires des sciences participatives « Citoscope », et de manière plus générale l'ensemble des don-

nées « profanes », recueillies par l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), en articulation avec le Système d'Information sur la Nature et les Paysages (SINP).

- Les dispositifs de recherche caractérisant **la dynamique de la biodiversité et le fonctionnement des systèmes écologiques du niveau local à la région**, notamment les Observatoires Homme-Milieu dans leur volet biodiversité, le Grand Observatoire de l'environnement et de la biodiversité terrestre et marine du Pacifique Sud (GOPS), dans son volet biodiversité, les observatoires forestiers long terme d'Afrique centrale pour le suivi de la biodiversité en forêt tropicale, le réseau des Zones Atelier (ZA) dans son volet biodiversité, l'Observatoire pérenne de l'environnement de Meuse/Haute-Marne, le Réseau National des Stations d'Écologie Expérimentale (ReNSEE) dans son volet biodiversité, l'ECOSCOPE mer de l'IRD Sète et les Observatoires de recherche et expérimentation (ORE) dans leur volet biodiversité.
- Les dispositifs de recherche impliquant **le suivi et la caractérisation des ressources génétiques**, notamment le réseau des observatoires recherche sur les ressources génétiques « RGscope ». Ces dispositifs collectent des données qui sont mobilisées pour répondre à des objectifs scientifiques divers et ont généralement un fort lien avec la gestion opérationnelle des ressources génétiques. Ils ont tendance à s'organiser en réseaux, avec des liens vers l'international.
- 3. **Des dispositifs d'expérimentation**, notamment AnaEE France (Analysis and Experimentation on Ecosystems). Cette infrastructure de recherche, portée par le CNRS et l'INRA, réunit, dans un réseau intégré, un ensemble de plateformes expérimentales, analytiques et de modélisation dédiées à la biologie des écosystèmes continentaux, terrestres et aquatiques. L'infrastructure s'articule autour des deux Ecotrons de la Très Grande Infrastructure de Recherche du CNRS (offrant des moyens pour contrôler et suivre les écosystèmes *ex-natura*), de trois plateformes expérimentales en milieu semi-naturel (afin de manipuler des écosystèmes terrestres et aquatiques dans des conditions intermédiaires entre celles des Ecotrons et des sites *in situ*) et une vingtaine de sites naturels en France métropolitaine et en Guyane française pour réaliser des expérimentations *in situ* sur le long terme dans une large gamme de biomes (forêts, culture, prairies et lacs).

Ces dispositifs de collection, d'observation et d'expérimentation constituent des outils essentiels pour la communauté de recherche française qui nécessite des séries temporelles longues et la mise en regard de données et variables biologiques, écologiques, environnementales, socio-économiques et anthropiques. Ces informations, réunies dans des collections et/ou des bases de données, contribuent aujourd'hui à assurer le suivi systématique de la biodiversité, à caractériser sa dynamique et à étudier ses évolutions actuelles et possibles en fonction de plusieurs pressions tels les changements climatiques et les pressions anthropiques (utilisation des terres...).

L'initiative nationale ECOSCOPE a pour vocation de fédérer et renforcer les réseaux d'observatoires de recherche et les systèmes d'observation de la biodiversité, pour mieux organiser la collecte, la gestion et l'exploitation des données. Projet inter-organismes coordonné par la FRB, ECOSCOPE est labellisé «Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement» (SOERE) depuis 2011 par l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi) et «Infrastructure de recherche nationale».

L'objectif d'ECOSCOPE est de parvenir à ce que les systèmes d'observations permettent d'une part d'alimenter la recherche pour comprendre et anticiper les changements d'état et de dynamique de la biodiversité et des services écosystémiques et d'autre part de fournir des informations et des synthèses pour l'appui à la décision politique.

ECOSCOPE constitue ainsi une plateforme nationale de coordination avec une prise en compte de la dimension intégrative de la biodiversité. Il réunit, dans le respect du principe de subsidiarité, une grande diversité de réseaux d'observatoires et de dispositifs élémentaires d'observation pour la recherche en biodiversité : observations et caractérisation des ressources génétiques, observations dans le cadre de sciences participatives encadrées par la recherche, observation des écosystèmes par thème. Tous les niveaux d'organisation de la biodiversité sont

concernés, du niveau infra-spécifique – sauvage et domestique – aux écosystèmes. L'emprise spatiale des observations s'échelonne du niveau local au niveau international.

L'enjeu scientifique d'ECOSCOPE repose sur la complémentarité des observations. Afin de donner une visibilité aux réseaux et aux dispositifs d'observation, aux systèmes d'informations et aux jeux de données disponibles, ECOSCOPE développe un portail national de métadonnées. Les données primaires restent organisées à l'échelle des observatoires : c'est à travers l'usage des métadonnées qu'ECOSCOPE stimule les liens entre producteurs et utilisateurs de données pour favoriser les analyses conjointes et la (ré)utilisation des données.

ECOSCOPE assure également l'intégration des dispositifs nationaux dans les programmes nationaux et internationaux. Relai de la communauté scientifique vers l'expertise et lien avec les dispositifs portés par le ministère de l'écologie tels le «Système d'Information sur la Nature et les Paysage» (SINP) et l'«Observatoire National de la Biodiversité» (ONB), ECOSCOPE anime aussi une contribution française aux initiatives internationales EU BON et GEO BON.

À la lumière de cet état des lieux, on peut dire que les systèmes d'information sur la biodiversité connaissent un important processus de développement et de restructuration à l'échelle nationale, répondant à des besoins identifiés dans chacun des axes de cette prospective. Néanmoins, l'ampleur de la tâche et, surtout, le niveau insuffisant des moyens alloués fait que les verrous et les opportunités déjà identifiés en 2009 pour parvenir à ces objectifs, restent d'actualité en 2014. Si les structures existent ou se mettent en place, tous les acteurs mettent cependant l'accent sur 1) l'importance des coûts associés au développement et à la maintenance de ces systèmes d'information (notamment en termes de mobilisation de compétences spécifiques) et 2) le renforcement nécessaires des interactions entre les systèmes d'information existants.

PROSPECTIVE : DES SYSTÈMES D'INFORMATION POUR DOCUMENTER, COMPRENDRE ET DÉCIDER

Les systèmes d'information contribuent à documenter la distribution spatio-temporelle et la dynamique de la diversité des espèces, ainsi que de leur diversité génétique et fonctionnelle, la diversité des écosystèmes et leurs caractéristiques structurelles et fonctionnelles. Il s'agit de parvenir à une description aussi précise et exhaustive que possible de la biodiversité à l'échelle nationale, aux différents niveaux d'organisation biologique, d'examiner les mécanismes putatifs entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, de documenter des patrons qui puissent alimenter différents types de modèles existants.

Les différents niveaux d'organisation biologique doivent être envisagés, au moins selon deux types de hiérarchies :

- Systématique et évolutive : taxons (sous-espèces, espèces, genres...), évolution dans le temps (phylogénies) et dans l'espace (biogéographies) et leurs interactions (co-evolution s.l.), etc.

- Écologique et fonctionnelle : populations, communautés, écosystèmes, paysages, bassins-versants, etc.

L'organisation de ces hiérarchies, aux différentes échelles spatiale et temporelle gagnerait à être documentée et analysée. Les moyens nécessaires combinent observations *ex-situ in natura* et *in-situ*, expérimentations et modélisations, et appellent une amélioration et une coordination des techniques et méthodes d'observation. Pour y parvenir, des dispositifs d'observation sur le long terme sont indispensables et ils doivent être établis en relation avec les problématiques de recherches en biodiversité et s'appuyer sur les nombreux systèmes d'information gérés par la recherche française qui fonctionnent souvent depuis des années.

> SIX PRIORITÉS POUR LE DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES D'INFORMATION

Pour répondre à ces enjeux, six priorités ont été identifiées dans le but de poursuivre le déploiement de systèmes d'information performants et susceptibles de contribuer de répondre aux questions de recherche actuelles.

5.1 Coordonner et pérenniser les dispositifs existants

Un premier besoin majeur identifié est de structurer et compléter les réseaux d'observation et d'expérimentation et les collections, afin d'organiser l'information et de mettre à disposition les données de la biodiversité. Pour cela, il faut coordonner et valoriser les dispositifs existants : c'est-à-dire assurer une cohérence concernant la couverture thématique, spatiale et temporelle, les variables essentielles mesurées (voir plus loin les « Essential Biodiversity Variables ») et les indicateurs utilisés, de format et d'interopérabilité des données. Cela suppose de relever de nombreux défis liés à la diversité des méthodologies, des données, des standards, dont il faut assurer l'interopérabilité, ainsi qu'au problème de la propriété des données et de l'accès à ces données. Il faut d'une part, organiser, coordonner et déployer les protocoles de collecte d'information, d'observation et d'expérimentation des systèmes écologiques et d'autre part, s'assurer de leur pérennisation et leur interactivité (protocoles d'échange, standards et thésaurus, etc.)

Le concept de Variables Essentielles de Biodiversité (Essential Biodiversity Variables - EBVs), promu par

le Réseau d'Observation de la Biodiversité (BON) du Groupe d'Observations de la Terre (GEO), a récemment émergé dans le champ de la recherche sur la biodiversité (Pereira *et al.*, 2013). Il s'agit d'améliorer les suivis actuels de biodiversité et de converger vers un ensemble d'observations répétées, suivant un plan d'échantillonnage représentatif. Les EBVs, réparties en 6 classes, représentent un ensemble minimal de variables biologiques à mesurer à différents niveaux d'organisation (de l'infra-spécifique aux écosystèmes).

Ces variables permettent de transformer les données produites par les nombreux réseaux d'observation du monde vivant en un ensemble harmonisé de variables d'un niveau d'abstraction intermédiaire (entre l'information brute et l'indicateur) et conçues pour une description synthétique de la biodiversité à partir de l'agrégation de données issues de sources variées. Elles s'intègrent dans une chaîne de valeur, depuis les données primaires jusqu'à l'utilisation en recherche, pour la réalisation de scénarios et l'aide à la décision.

En intégrant tous les niveaux et échelles d'organisation du monde vivant, la classification des EBVs est structurante pour les systèmes d'observation de la biodiversité, cohérente avec leur vocation d'infrastructure de recherche et pertinente pour l'élaboration d'indicateurs utiles à la décision publique. L'information attachée aux classes d'EBVs facilite la complémentarité des observatoires dans leurs rôles d'appui aux projets de recherche scientifique – en amont des simulations de

scénarios d'évolution globale de la biodiversité – et de développement d'outils d'aide à la décision tels que les synthèses et les indicateurs.

5.2 Favoriser une utilisation accrue des données existantes

Pour que les données puissent contribuer efficacement à l'avancée des connaissances, il est essentiel de faire progresser l'utilisation et la valorisation de données déjà collectées, au-delà du contexte initial dans lequel elles ont été acquises.

Pour ce faire, il faut promouvoir la mise en place de véritables « plans de gestion des données » par la mise en œuvre des procédures spécifiques pour chacune des étapes de planification, de collecte, de contrôle-qualité, de description, d'analyse et d'archivage des données. Certaines de ces procédures sont encore très peu intégrées aux pratiques courantes des acteurs impliqués dans la collecte et la gestion des données de la biodiversité, comme par exemple l'enregistrement systématique de la façon dont les données sont analysées, la clarification de la façon dont celles-ci peuvent être diffusées et réutilisées ou encore la planification des budgets pour leur archivage pérenne. L'objectif majeur de la discipline émergente de l'éco-informatique est de permettre le développement de ce type d'approche globale de gestion des données, qui nécessite des interactions fortes entre sciences de l'information, informatique et sciences de la nature.

Les métadonnées permettent de documenter et de décrire finement les données hébergées dans les

systèmes d'information et d'en faire connaître les conditions d'accès. Elles permettent de découvrir et localiser des jeux de données hétérogènes, dispersés, d'origines et de contenus distincts; de comprendre les contextes et méthodes de collecte, la qualité associée aux données. En rendant ces informations facilement accessibles, les métadonnées favorisent la (ré)utilisation des données dans des projets de recherche et les synthèses.

Il faut également promouvoir les activités de synthèse scientifique et de méta-analyses au cours desquelles les données sont effectivement réutilisées dans un contexte qui peut être différent de celui dans lequel elles ont été initialement acquises et qui permettent d'identifier de nouvelles questions et approches et conduisent à la conception d'expérimentations et/ou synthèses originales.

Enfin, il convient de permettre une utilisation renforcée des données acquises par des acteurs hors du champ de la recherche, notamment en renforçant les partenariats autour des protocoles de collecte (voir aussi priorité 2.6).

5.3 Évaluer et combler les lacunes d'information et mobiliser de nouvelles techniques d'observation

Il est également essentiel de renforcer l'acquisition de données nouvelles. À travers une analyse critique des lacunes des systèmes d'information et des données nécessaires pour alimenter les recherches sur la biodiversité, il faut améliorer la pertinence des données



Groupe de travail NETSEED, Mars 2012

collectées et compléter les variables recueillies, le grain spatial, le rythme des observations ou encore la longueur des séries d'observation envisagées. Cela doit permettre de répondre à un double enjeu :

- **délivrer de nouvelles données** primaires, plus intégrées, afin de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre, de documenter les indicateurs et d'affiner les modèles, écologiques, socio-économiques, et les scénarios ;
- **générer de grands jeux de données** pour les méta-analyses nécessaires pour répondre à des questions globales (incidence des changements climatiques, du réchauffement, de l'introduction des espèces envahissantes...).

La qualité des données et leur pertinence dépendent des techniques et des protocoles d'observation mis en œuvre. Ils doivent être améliorés, automatisés, mis à disposition du plus grand nombre. Cela concerne en particulier :

- L'identification taxonomique et phylogénétique (notamment à travers le barcoding) ;
- La numérisation des collections dont les nouvelles approches permettent d'accélérer grandement l'enregistrement des connaissances déjà acquises ;
- À l'échelle de l'observation *in-situ* (individus), le rôle croissant des systèmes embarqués et des systèmes électroniques et informatiques autonomes ;
- À des échelles plus larges (populations, communautés), les techniques d'échantillonnage, notamment celles qui sont automatisables (mesures de l'ADN environnemental, caractérisation des univers sensoriels et sonores, analyse d'images à l'échelle des sites, des écosystèmes, des paysages, etc.)

5.4 Relever le défi taxonomique et sémantique, élaborer des référentiels

La prospective de 2009 identifiait le renforcement des efforts d'exploration et de description de la biodiversité comme un enjeu fondamental afin de réduire la part de l'inconnu. Parce qu'elle indexe l'ensemble de la biologie et fait le lien entre différentes disciplines scientifiques à travers un même objet vivant – l'espèce – elle-même unité de communication pour la société, la taxonomie a trouvé un regain d'intérêt ces dernières années. Ce renouveau est porté par les progrès technologiques et les avancées conceptuelles apparus dans le champ de la caractérisation moléculaire des composants de la biodiversité (séquençage haut débit, barcoding, méthodes informatisées de délimitation des espèces...) et de la numérisation à grande échelle des collections. La prise en compte de la biodiversité aux niveaux génome-protéome-métabolome ouvre également de nouvelles voies de recensement et d'identification des composants de la biodiversité.

Si des progrès certains ont été obtenus avec la mise en place de nouvelles infrastructures nationales pour conserver et organiser les données taxonomiques

primaires et accélérer leur acquisition, le défi taxonomique reste d'actualité. Plus politique et matériel qu'intellectuel ou méthodologique (du fait des possibilités offertes par le développement des approches en -omiques), l'enjeu est la pertinence des décisions face à la fragilité du socle de connaissances (80% des unités de travail de la biodiversité, les espèces, restent à découvrir et à décrire). Aussi importe-t-il de maintenir et renouveler l'expertise taxinomique et écologique en renforçant le pool des systématiens (taxonomistes) et écologues français. Il faut également accompagner le développement d'une taxonomie participative, tout en s'assurant d'une indispensable rigueur scientifique. En effet, les 2/3 des taxons décrits chaque année en Europe le sont par des non professionnels (Fontaine *et al.*, 2012).

Le défi majeur des systèmes d'information sera en effet leur interopérabilité. Cela passe par une structuration précise de l'information, soit avant tout bien comprendre (sémantique précise des données engrangées) et reconnaître (dictionnaire des types d'information traités) les unités d'information traitées et les liens qui les organisent au sein des bases de données. Celles-ci ne cessent de se multiplier et grandir pour naturellement accompagner la multitude des problématiques scientifiques abordées. C'est en reliant sur la base de standards universels ces silos de données isolés que l'on mettra en place un réseau global d'informations pour des réponses globales plus pertinentes aux questions de changements globaux qui nous animent.

5.5 Articuler ces systèmes avec les autres bases de données environnementales ou socio-économiques

Le renforcement des données et connaissances sur l'état et de la dynamique de la biodiversité doit permettre de mieux comprendre les conséquences de certaines pressions anthropiques, ainsi que les interactions entre les changements de biodiversité, les fonctions des écosystèmes et les services écosystémiques que les sociétés humaines en retirent. Pour développer ces connaissances, il faut pouvoir documenter, comprendre et modéliser la biodiversité en y intégrant les dimensions physiques et sociétales. Pour cela il est nécessaire d'articuler les données concernant la biodiversité avec celles sur les pratiques agricoles, l'économie, le climat (etc.), afin d'y intégrer les aspects anthropiques, et ce, à différentes échelles (notamment locales, dans un contexte spatial délimité). Cela nécessitait de développer des approches holistiques et d'investir la sphère digitale pour assurer l'interopérabilité et le traitement de multiples données hétérogènes. Différents dispositifs opérationnels de veille environnementale, qui mobilisent des moyens importants et collectent de nombreuses données, peuvent s'avérer intéressants. Ils concernent des thèmes tels que la qualité de l'eau, les pesticides et

l'impacts des pratiques agricoles, les ennemis des cultures, les impacts des transports et des industries, des technologies.

5.6 Développer les liens avec les acteurs de la société

Ces connaissances plus intégrées sur les interactions entre la biodiversité et les activités humaines correspondent à une demande de la société. Dans le domaine du suivi environnemental, et singulièrement de la biodiversité, cette demande est particulièrement forte : il s'agit de produire des évaluations de l'état de la biodiversité, des indicateurs et des scénarios, sur lesquels puissent s'appuyer les politiques publiques, les mesures de gestion, les opérations de compensation et plus largement les stratégies des acteurs. Dans ce contexte, la structuration des systèmes d'information et la production de connaissances qui en découlent gagneraient à s'ouvrir davantage aux acteurs de

la société, pour favoriser la mise à disposition et le partage des données et plus largement le débat sociétal sur les relations entre la biodiversité et les sociétés humaines.

Dans cet esprit, une mutualisation des moyens entre la recherche et les acteurs de la société semble pertinente. Une mise en cohérence des dispositifs opérationnels et de recherche bénéficierait aux dispositifs en place, que ce soit en matière de gain d'expertise pour les dispositifs opérationnels ou de gains de connaissance pour les dispositifs de recherche. Différentes pistes sont à explorer pour permettre l'utilisation par la recherche de données récoltées selon des protocoles « non spécifiés » : un apport des chercheurs à l'évolution des systèmes non académiques, le partage d'expériences et de bonnes pratiques, la prise en compte des observations empiriques et savoirs traditionnels, le retour vers les acteurs, etc.

> CONCLUSION

L'acquisition de nouvelles données sur la biodiversité plus pertinentes en regard des besoins de recherche et une meilleure mobilisation des données existantes constituent un enjeu clé pour la recherche sur la biodiversité, susceptible de contribuer à des avancées majeures. En effet, les progrès sur de nombreux fronts de science identifiés dans les axes thématiques sont conditionnés à la disponibilité de jeux de données pouvant permettre de répondre aux questions posées.

La coordination des systèmes d'information existants, leur pérennisation et l'acquisition de données manquantes, dans une perspective d'interopérabilité croissante, constituent un fil directeur pour promouvoir la recherche sur la biodiversité dans toutes ses facettes. Le dialogue avec les acteurs et l'intégration de données sur les activités humaines dépendent également de la structuration en cours.



SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES : TERRITOIRES, INNOVATION ET ACTIONS

Contribution et rédaction :
Marie-Christine Cormier-Salem,
Bernard Bodo, Flora Pelegrin,
Jean-François Silvain,

ENJEUX ET ÉTAT DES LIEUX

Une question traverse les grands enjeux et les priorités identifiés dans différents domaines de la recherche sur la biodiversité : comment favoriser des avancées scientifiques majeures, des innovations déterminantes pour éclairer et promouvoir l'action en faveur de la biodiversité ?

On a vu que des progrès importants étaient en cours dans l'acquisition et la gestion des données, ainsi qu'en matière de modélisation. Des avancées importantes sont également venues de l'apport des sciences économiques et sociales, qui ont fortement contribué à transformer les approches dans le champ de la conservation de la biodiversité, mais également, comme le soulignait déjà la prospective 2009, la perception de la biodiversité comme une source de richesses et le support d'activités économiques, à travers des diverses innovations inspirées ou retirées de l'exploration du monde vivant. Au-delà d'un discours sur l'innovation qui reste parfois incantatoire, quelles sont les types et modes d'innovations à promouvoir ?

Dans le champ de la biodiversité, l'innovation inclut deux approches complémentaires. D'une part, des innovations de tout ordre qui proposent des **outils et pratiques nouvelles pour améliorer la gestion de la biodiversité et la gouvernance des territoires** et qui méritent d'être mises en valeur et soutenues par la recherche. D'autre part, **la biodiversité elle-même est source d'innovations** susceptibles d'une valorisation économique, qui en retour fournit un socle et une incitation à la gestion durable des ressources utilisées. Ce principe, qui veut que l'innovation doit *in fine* contribuer à mieux préserver la biodiversité et à en assurer un usage durable, fournit un fil conducteur pour guider les recherches en matière d'innovation économique et technologique pour la biodiversité.

> INNOVATIONS POUR LA GOUVERNANCE DE LA BIODIVERSITÉ DANS LES TERRITOIRES

L'ensemble des questions et enjeux évoqués dans cette prospective a mis en lumière qu'il est plus que jamais nécessaire, pour mieux protéger la biodiversité et l'utiliser de manière durable, d'associer les connaissances sur les systèmes écologiques avec celles concernant les systèmes humains, notamment la gouvernance, les interactions entre les parties prenantes et leur participation aux processus de décision et de gestion. Il est désormais acquis que gérer séparément ces systèmes imbriqués s'avère la plupart du temps inefficace pour la protection de la biodiversité. La gouvernance (quels sont les systèmes de valeurs, les règles d'accès, les normes ? quels sont les acteurs et leurs institutions : qui décide ?) et les modes de gestion des ressources (les usages, les techniques, les pratiques) jouent un rôle crucial pour la réussite des actions de conservation et de valorisation économique de la biodiversité.

Cet enjeu majeur a conduit le conseil scientifique à mettre en avant les concepts, cadres de réflexions et approches qui cherchent à coupler la compréhension

des systèmes biologiques et celles des systèmes humains. Les notions de « système couplés hommes-environnement », de « socio-écosystème » ou encore de « territoire », par des approches complémentaires, à différentes échelles, visent à favoriser ce couplage et à lui conférer une portée opérationnelle. Les services écosystémiques sont souvent mobilisés comme un « concept frontière » pour l'interdisciplinarité et deviennent un outil pour faire le pont entre des corpus de connaissances allant de l'appréhension des valeurs, savoirs et pratiques associées à la biodiversité, aux connaissances sur son état et sa dynamique et sur le fonctionnement des écosystèmes, jusqu'à la gestion des synergies et compromis entre services écosystémiques à l'échelle d'un territoire. La prise en compte dans la modélisation des rétroactions entre différents phénomènes, de la résilience des systèmes, de leur potentiel d'adaptation, mais aussi de l'analyse des conflits, des jeux d'acteurs et de l'acceptabilité sociale des actions de conservations de la biodiversité reste cependant un défi à relever.

Des développements conceptuels nouveaux se consolident progressivement autour de la gouvernance et de la gestion à l'échelle des territoires. Ensembles d'écosystèmes et de paysages, mais aussi constructions socio-spatiales, avec une histoire, une dynamique, des acteurs et des stratégies, les territoires se prêtent particulièrement à la valorisation d'acquis scientifiques récents et au développement de recherches mobilisant de nouvelles approches et de nouvelles données pour l'analyse des trajectoires interdépendantes des écosystèmes et des sociétés, en prenant en compte

l'emboîtement des échelles. Il s'agit d'anticiper l'évolution des systèmes naturels, mais aussi de révéler les solidarités entre groupes sociaux et portions de territoire, les jeux de pouvoir (économique et politique) et les divergences d'intérêts. Les démarches participatives d'élaboration de scénarios territoriaux représentent ainsi une voie d'innovation importante en vue d'élaborer des outils d'aide à la concertation, la communication et *in fine* la décision (Rey-Valette *et al*, 2011), à travers une modélisation du devenir des systèmes et de l'impact potentiel des choix présents.

> APPROCHES ET PRATIQUES INNOVANTES POUR LA GESTION DURABLE DE LA BIODIVERSITÉ

Les méthodologies d'intervention mises en œuvre ou à développer pour la restauration d'écosystèmes et de milieux naturels dégradés (ou le renforcement de leur résilience) ainsi que pour la conception, la transformation et le « pilotage » d'écosystèmes pour favoriser à la fois leur durabilité et la production de services utilisés par les sociétés humaines, forment un champ scientifique porteur d'innovation et de découvertes. On pourra citer notamment le développement de l'ingénierie écologique, de l'agro-écologie, de l'écologie urbaine ou encore de l'écologie industrielle.

L'ingénierie écologique, dans son acception la plus large, consiste à « rendre plus durables les activités humaines en remplaçant au maximum l'usage de ressources non-renouvelables par des processus

écologiques ». Parmi les approches innovantes pour et par la biodiversité, on peut identifier le développement d'éco-technologies moins dépendantes des énergies fossiles et plus économes en ressources naturelles ou le développement du traitement par le génie végétal d'effluents (phyto-épuration) et de sols pollués (phytoremédiation), par exemple la restauration naturelle de sols miniers par des plantes accumulatrices de métaux. La restauration et l'aménagement écologique de milieux littoraux (gestion du trait de côte, stabilisation de dunes) entrent également dans ce cadre, ainsi que la construction de zones humides artificielles pour réduire la pollution par les pesticides des nappes phréatiques.

> EXPLORATION DU VIVANT ET INNOVATIONS BIOTECHNOLOGIQUES

La diversité biologique est à l'origine d'une diversité considérable de molécules dont l'inventaire est encore loin d'être achevé. Produit de l'expression des gènes et résultat de 3,7 milliards d'années d'évolution des organismes vivants, les substances naturelles offrent des potentialités considérables : plus de 200 000 structures actuellement décrites ont été et sont encore une ressource pour les biotechnologies (pharmacie, agrochimie, cosmétique...). Elles offrent aussi des outils moléculaires pour l'exploration du vivant et pour la compréhension des interactions biotiques dans les écosystèmes. Dans différents domaines, l'accès à des ressources renouvelables d'origine naturelle est important (arômes alimentaires, acides à chaînes courtes, acides gras, solvants...) et pose des questions concernant la gestion durable de leur disponibilité. Suite aux récents accord internationaux (protocole de Nagoya, règlement européen) et à leur traduction en cours dans le droit français (loi sur la biodiversité), la recherche et le développement pour l'utilisation des ressources génétiques issues de la biodiversité impliquera la mise en place de procédures

d'accès et de partage des avantages (APA) qui vont avoir des conséquences pratiques pour la recherche dans ce domaine.

Considérant le regain d'intérêt pour les plantes médicinales et l'importance croissante des médecines utilisant les plantes, une meilleure connaissance de la ressource et des métabolites produits est importante, tant pour des questions de qualité (variabilité des métabolites entraînant la variation des propriétés pharmacologiques de façon non-prédictible et non-reproductible), que de disponibilité et de durabilité (les sur-collectes créent des menaces sur la ressource et il est nécessaire de préserver ces plantes et les savoirs associés). Tout cela conduit à améliorer les contrôles de qualité des médecines fondées sur des plantes et des compléments alimentaires, par l'analyse chimique des extraits en vue de mieux connaître les principes réellement actifs des plantes, les contaminants (pesticides, métaux lourds, microbes...) et les adultérations (présence d'autres plantes, composés de synthèse...).

Au-delà de la bioprospection comme source de molécules ou d'objets, la biodiversité peut être une source d'inspiration pour l'innovation par les modèles qu'elle utilise ou par les procédés qu'elle met en jeu pour produire ces objets (bioinspiration/biomimétisme). Ainsi, une plante peut être considérée comme une usine pour la fabrication de molécules, pour analyser les procédés de biosynthèse. La biodiversité est aussi une source de structures macromoléculaires et supra-moléculaires à l'origine de biomatériaux présentant un intérêt particulier pour leurs propriétés d'auto-organisation, d'autoréparation ou de biodégradation, mais aussi de modèles de matériaux industriels, issus ou inspirés du vivant, ou encore mimant les matériaux du vivant. De nombreux exemples illustrent la fécondité de ces approches et les potentialités de bio-matériaux comme le corail ou la nacre pour la chirurgie réparatrice, les soies naturelles et les fils d'araignées pour inspirer des polyamides de synthèse (Nylon, Kevlar), les revêtements hydrophobes des feuilles de lotus pour des peintures et vernis autonettoyants, les fruits de la bardane pour des structures de type Velcro...

Une attention particulière doit être apportée aux potentialités des micro-organismes, non seulement pour l'obtention de bioproduits (antibiotiques), mais aussi de bioproductions et biotransformations technologiques (bioconversions), alimentaires (fermentations), agronomiques (bactéries fixatrices d'azote), environnementales (dépollution) ou énergétiques (bioproduction d'énergie par dégradation microbienne de la biomasse). Certains aspects économiques et sociaux, telle la valorisation des déchets et des sous-produits de la production agricole comme sources potentielles de matériaux (cane et betterave à sucre, huiles végétales telle l'huile d'olive source de flavonoïdes...) sont à prendre en compte. Ceci implique une meilleure connaissance de la diversité de ces micro-organismes, de leur fonctionnement et de leurs interactions avec les autres organismes de l'écosystème.

Un des enjeux émergents dans le champ des biotechnologies est la prise en compte des développements actuels en biologie de synthèse (ou biologie synthétique). Définie comme la conception intentionnelle de systèmes biologiques artificiels, elle utilise des molécules non-naturelles pour mimer les naturelles ou assemble des molécules naturelles dans des systèmes non-naturels, avec comme objectif la création d'une vie artificielle. Il ne s'agit pas de transfert de gènes, mais de la création (synthèse) de gènes, qui sont ensuite introduits dans de nouvelles entités cellulaires, visant à terme à créer des systèmes biologiques totalement ou partiellement artificiels, qui

n'existent pas dans la nature, avec un intérêt pour des organismes minimaux.

L'émergence de la biologie synthétique s'appuie sur la puissance analytique de la biologie moléculaire et sur les modèles prédictifs et explicatifs qui en intègrent les résultats (biologie systémique), ainsi que sur la chute drastique des coûts du calcul scientifique et de la lecture et de l'écriture de l'ADN. Elle associe des éléments de la biologie moléculaire, de la biologie systémique, de l'ingénierie, de la génétique, de la chimie et de l'informatique.

Ses applications potentielles concernent la santé, l'agriculture, l'énergie, la chimie, les procédés industriels, la remédiation environnementale, les moyens de lutte contre le changement climatique ou encore la crise énergétique. Ses applications actuelles, encore modestes, concernent par exemple la production d'un antipaludique (l'artémisinine), de cortisone et de vaccins utilisant des plantes comme bioréacteur. La complexité du vivant, en particulier l'importance de ses interactions avec son environnement et la difficulté d'en prédire l'évolution, constitue un verrou au développement de la biologie de synthèse. Ses risques sont discutés et comparés à ceux des OGM concernant la dissémination dans l'environnement d'organismes mal contrôlés. Mais on est encore loin de la création du vivant : aucun organisme vivant n'a été créé à partir d'acides nucléiques non naturels et si la mise en œuvre d'un système génétique artificiel est envisageable, on ignore si de tels organismes peuvent être créés et comment l'on pourrait évaluer leurs risques potentiels. Pour le moment, les études menées ne semblent pas faire apparaître de risques vraiment nouveaux liés à la biologie synthétique et donc la nécessité de nouvelles réglementations. Cependant, l'accélération du transfert de la recherche à l'industrie favorise le passage d'un milieu confiné, en laboratoire, à une échelle où les risques de contamination deviennent plus importants, nécessitant de mener en parallèle des recherches en biosécurité, bio-sûreté et écotoxicologie (Dana *et al.*, 2012 ; Collins *et al.*, 2012). Cela implique le développement des recherches fondamentales en biologie pour mieux comprendre les impacts et évolutions des nouveaux produits sur l'environnement, la santé, mais aussi de recherches concernant l'impact sur les pratiques et les équilibres sociaux. Enfin, il restera à concilier le partage du savoir et les principes de propriété intellectuelle et les questions éthiques liées à la spécificité du vivant, dans le cadre du modèle économique développé autour du vivant, la bio-économie.

> CADRE INSTITUTIONNEL, MODÈLE ÉCONOMIQUE ET DIMENSION SOCIALE DE L'INNOVATION

Il est ici utile de souligner que l'innovation ne concerne pas seulement le développement de nouvelles applications industrielles ou de nouvelles pratiques de gestion. Elle s'inscrit dans le tissu social et institutionnel, dans un cadre économique et juridique qui joue un rôle crucial pour favoriser son émergence.

Les approches liées à la bio-économie ou à la « croissante verte », les apports de l'économie de la biodiversité aux processus de décisions, ainsi que les développements récents en matière de réglementation et de fiscalité écologique ouvrent des pistes intéressantes, mais pèchent encore par le manque de connaissances fondamentales sur lesquelles elles s'appuient et sur un manque de formations à différents niveaux (décideurs, ingénieurs, etc.). Elles supposent à la fois de fortes précautions et des signaux politiques forts, susceptibles d'inciter les acteurs à sortir des logiques et stratégies en place, qui peuvent freiner l'innovation. Les dimensions éthiques, juridiques et économiques de certains secteurs d'activité nouveaux nécessitent d'être explicités pour ouvrir la voie à un cadrage social et politique. En outre, l'évaluation de la pertinence et de l'incidence des politiques publiques ayant des implications pour la biodiversité, ainsi que les besoins de recherche associés, appellent un investissement fort de la part de la communauté scientifique.

Enfin, la dimension sociale de l'innovation est un aspect essentiel et bien souvent négligé, y compris en ce qui concerne les trajectoires technologiques. Il importe de comprendre les processus sociaux de diffusion et d'appropriation des technologies et des pratiques nouvelles, ainsi que des innovations institutionnelles et organisationnelles. Les démarches collaboratives jouent parfois un rôle important pour stimuler et diffuser les innovations. La contribution croissante des sciences participatives dans le domaine de la biodiversité est aussi un exemple d'innovation intéressant à cet égard.

On le voit, les voies à développer pour mettre les acquis scientifiques récents au service de l'action pour la biodiversité sont nombreuses. Elles supposent de poursuivre l'exploration du vivant et de renforcer les connaissances fondamentales sur les systèmes écologiques et socio-écologiques. Elles nécessitent aussi une interface renouvelée et renforcée avec les acteurs de la société afin de bien caractériser la demande sociale dans différents domaines : quelles innovations pour gérer les impacts sur la biodiversité, pour concilier production et biodiversité, pour identifier des matières premières, pour remplacer la chimie polluante (etc.) ? Un enjeu essentiel est donc de faciliter les continuités entre recherche fondamentale, recherche finalisée et société, ainsi qu'entre recherche académique et recherche privée, par exemples dans le domaine de l'ingénierie écologique, dans le secteur des services de l'environnement ou encore de l'industrie pharmaceutique. Enfin, il faut rappeler l'importance d'une meilleure information du public, qui est très peu conscient du potentiel de la biodiversité, alors que les implications pharmaceutiques et sur le biomimétisme (par exemple) sont susceptibles de susciter un intérêt plus larges pour les questions et enjeux associés à la biodiversité dans son ensemble.

*Espérons et gageons que
la recherche sur et pour la
biodiversité a de beaux jours
devant elle !*



BIBLIOGRAPHIE

- Barnosky A.D., Matzke N., Tomiya S. *et al.* (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51-57.
- Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W., Courchamp F. (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365-377.
- Beuret J.E., Cadoret A. (2010) *Gérer ensemble les territoires. Vers une démocratie coopérative*. Paris, Charles Léopold Mayer.
- Benyus J.M. (Ed.) (2011) *Biomimétismes. Quand la nature inspire des innovations durables*. Paris, Rue de l'échiquier.
- Borrini-Feyerabend G., Pimbert M., Farvar M.T., Kothari A., Renard Y. (2009) *Partager le pouvoir: cogestion des ressources naturelles et gouvernance partagée de par le monde*. Cenesta, Téhéran : IIUED et UICN/CEESP/TGER, 499 pp.
- Butchart S.H.M., Walpole M., Collen B. *et al.* (2010) Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, 328, 1164-1168.
- Cardinale B.J., Duffy J.E., Gonzalez A., Hooper D.U., Perrings C., Venail P., Narwani A., Mace G.M., Tilman D., Wardle D.A. *et al.* (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59-67.
- Carpenter S.R., Mooney H.A., Agard J., Capistrano D., DeFries R.S., Diaz S., Dietz T., Duraipappah A.K., Oteng-Yeboah A., Pereira H.M., Perrings C., Reid W.V., Sarukhan J., Scholes R.J., Whyte A. (2009) Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 1305-1312.
- Chapin F.S., Zavaleta E.S., Eviner V.T. *et al.* (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234-242.
- Chevassus-au-Louis B. *et al.* (2009) *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes, contribution à la décision publique*. Centre d'analyse stratégique, Rapports et documents. 399 pp.
- Collins J. (2012) Bits and pieces come to life. *Nature*, 483, S8-S10
- Colyvan M., Justus J., Regan H.M. (2010) The natural environment is valuable but not infinitely valuable. *Conservation Letters*, 3, 224-228.
- Commissariat général au développement durable (2014) *La biodiversité : écosystèmes, fonctions et services écosystémiques*. Bibliographies du CRDD, 12pp.
- Commissariat général au développement durable (2013) *L'évaluation des écosystèmes et des services écosystémiques*. Projet EFESE. Bibliographies du CRDD, 34pp.
- Cordell G.A. (2011) Plant Medicines Key to Global Health. *Chemical & Engineering News*, 89, 52-56
- Couvet D., Devictor V., Jiguet F., Julliard R. (2011) Scientific contributions of extensive biodiversity monitoring. *Comptes Rendus Biologies*, 334, 370-377.
- Cormier-Salem M.C., Roussel B. (2002). Patrimoines et savoirs naturalistes locaux. In Martin J.Y. (Ed). *Développement durable ? Doctrines, pratiques, évaluations*. Paris, IRD, 125-142.
- Cormier-Salem M.C. (1995) Paysans-pêcheurs du terroir et marins-pêcheurs du parcours. Les géographes et l'espace aquatique. *L'espace géographique*, 1, 46-59
- Costello M.J., Marta C., Danovaro R., Halpin P., Ojaveer H., Miloslavich P. (2010) A Census of Marine Biodiversity Knowledge, Resources, and Future Challenges. *PLoS One*, 5 (8).
- Dana G.V., Kuiken T., Rejeski D., Snow A.A. (2012) Synthetic biology: Four steps to avoid a synthetic-biology disaster. *Nature*, 483, 29.
- Dawson T., Jackson S., House J., Prentice I., Mace G. (2011) Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science*, 332, 53-58.
- De Courcy R. (1992) *Les systèmes d'information en réadaptation*, Québec, Réseau international CIDIH et facteurs environnementaux, 5, 7-10.
- Devictor V. *et al.* (2010) Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity: the need for integrative conservation strategies in a changing world. *Ecology Letters*, 13, 1030-1040.
- Dirzo R., Young H.S., Galetti M., Ceballos G., Isaac N.J.B., Collen B. (2014) Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345, 401-406.
- Doussan I. (2009) Les services écologiques : un nouveau concept pour le droit de l'environnement ? In Cans C. (dir.) *La responsabilité environnementale, prévention, imputation, réparation*. Paris, Dalloz, 125-141.
- Ekens P. (2010) Eco-innovation for environmental sustainability: concepts, progress and policies. *International Economics and Economic Policy*, 7, 267-290.

- Ehrlich P.R., Ehrlich A.H. (2013) Can a collapse of global civilization be avoided? *Proceedings of the Royal Society of London B*, 280 : 20122845.
- Fontaine B., van Achterberg K., Alonso-Zarazaga M.A., Araujo R., Asche M. *et al.* (2012) New Species in the Old World: Europe as a Frontier in Biodiversity Exploration, a Test Bed for 21st Century Taxonomy. *PLoS ONE*, 7 : e36881.
- Galli A., Wackernagel M., Iha K., Lazarus E. (2014) Ecological Footprint: implications for biodiversity. *Biological Conservation*, 173, 121-132.
- Guiral C. (2013) Les valeurs de la biodiversité : un regard sur les approches et le positionnement des acteurs. Rapport FRB, série expertise et synthèse, 53 pp.
- Guillot A., Meyer J.-A. (2008) *La bionique. Quand la science imite la Nature*. Ed. Dunod, Paris.
- Harfoot M.B.J., Newbold T., Tittensor D.P., Emmott S., Hutton J. *et al.* (2014) Emergent Global Patterns of Ecosystem Structure and Function from a Mechanistic General Ecosystem Model. *PLoS Biol.* 12, e1001841.
- Hooper D.U., Adair E.C., Cardinale B.J., Byrnes J.E.K., Hungate B.A., Matulich K.L., Gonzalez A., Duffy J.E., Gamfeldt L., O'Connor M.I. (2012) A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486, 105-108.
- Howe C., Suich H., Vira B., Mace G.M. (2014) Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world. *Global Environmental Change*, 28, 263-275.
- Jones N., Perez P., Measham T., D'Aquino P., Daniell K., Dray A., Ferrand N. (2009) Evaluating Participatory Modeling: Developing a Framework for Cross-case Analysis. *Environmental Management*, 44, 1180-1195.
- Lavorel S., Colloff M.J., Mcintyre S., Doherty M.D., Murphy H.T., Metcalfe D.J., Dunlop M., Williams R.J., Wise R.M., Williams K.J. (2015) Ecological mechanisms underpinning climate adaptation services. *Global Change Biology*, 21, 12-31.
- Lavorel S. (2013) Plant functional effects on ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101, 4-8.
- Leadley P. *et al.* (2010) Scénarios de biodiversité : Projections des changements de la biodiversité et des services écosystémiques pour le 21^e siècle. Montréal : Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, *Cahier technique* n° 50, 55 pp.
- Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H.J. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 1786-1793.
- Mace G.M. (2013) Ecology must evolve. *Nature*, 503, 191-192.
- Mace G.M. (2014) Whose conservation? Changes in the perception and goals of nature conservation require a solid scientific basis. *Science*, 345, 1558-1560.
- Mace G.M., Norris K., Fitter A.H. (2012) Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology and Evolution*, 27, 19-26.
- Martinez-Harms M.J., Balvanera P. (2012) Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8, 17-25.
- Martinez-Harms M.J., Bryan B.A., Balvanera P., Law E.A., Rhodes J.R., Possingham H.P., Wilson K.A. (2015) Making decisions for managing ecosystem services. *Biological Conservation*, 184, 229-238.
- Maitre d'Hôtel E., Pelegrin F. (2012) Les valeurs de la biodiversité : un état des lieux de la recherche française. Rapport FRB, série expertise et synthèse, 48 pp.
- Matei S., Henckel L., Gauthier C.A., Le Roux X. (2011) *Biodiversity within the "Environment" theme of the 7th Framework Programme (2007-2010): funding amounts, success rates, temporal trends & comparisons between countries*. FRB report, 32 pp.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC, Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington DC, World Resources Institute.
- Murphree M.W. (1994) The role of institutions in community-based conservation. In Western D., Wright R.M., Strum S.C. (Eds), *Natural connections. Perspectives in community-based conservation*. Island Press, 600 pp.
- Nagendra H., Reyers B., Lavorel, S. (2013) Impacts of land change on biodiversity: making the link to ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 1-6.
- Nepstad D., McGrath D., Stickler C., *et al.* (2014) Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, 344, 1118-1123.
- Noite C., Agrawal A., Silvis K.M., Soares-Filho B.S. (2013) Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 4956-4961.
- Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (2012) *Rapport sur les enjeux de la biologie de synthèse*. Geneviève Fioraso (Députée) Assemblée nationale et Sénat.

- Ostrom E. (2011) Background on the institutional analysis and development framework. *Policy Studies Journal*, 39, 7–27.
- Ostrom E. (1990) *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge, Cambridge University Press, 280 pp.
- Parkes M.P., Morrison K.E., Bunch M.J., Hallstro L.K., Neudoerffer C.R., Venema H.D., Waltner-Toews D. (2010) Towards integrated governance for water, health and social–ecological systems: The watershed governance prism. *Global Environmental Change*, 20, 693-704.
- Pélissier P., Sautter G. 1970. Bilan et perspectives d'une recherche sur les terroirs africains et malgaches (1962-1969), *Etudes Rurales*, Paris, EHESS, Mouton et Co, n°37-38-39, 7-46.
- Pereira H.M., Navarro L.M., Santos Martins I. (2012) Global Biodiversity Change: The Bad, the Good, and the Unknown. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 25-50.
- Pereira H.M., Leadley P.W., Proenca V., Alkemade R., Scharlemann J.P.W., Fernandez-Manjarres J.F., Araujo M.B., Balvanera P., Biggs R., Cheung W.W.L., Chini L., Cooper H.D., Gilman E.L., Guenette S., Hurtt G.C., Huntington H.P., Mace G.M., Oberdorff T., Revenga C., Rodrigues P., Scholes R.J., Sumaila U.R., Walpole M. 2010. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science*, 330, 1496-1502.
- 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., Pettorelli 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.
- Rey-Valette H., Maurel P., Chia E., Guiheneuf P.Y., Michel L., Nougaredes B., Soulard C., Jarrige F., Guillemot S., Cunnac M., Mathé S., Barbe E., Ollagnon M., Delorme G., Prouheze N., Laurent A., Suita L.A., Bertrand J., Dieudonne C., Champorigaud A. (2011) *Guide pour la mise en œuvre de la gouvernance en appui au développement durable des territoires*. Cemagref, CNRS, Geysier, Inra, Supagro, Université Montpellier 1. Diffusion INRA-Montpellier, 155 pp.
- Sagoff M. (2011) The quantification and valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 70, 497–502.
- Sala O.E. et al. (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287, 1770-1774.
- Sanchez C., Arribart H., Giraud-Guille M.M. (2005) Biomimeticism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature Materials*, 4, 277-288.
- Sautter G., Pélissier P. (1964) Pour un atlas des terroirs africains. Structure type d'une étude de terroir. *L'Homme*, IV, 56-72.
- Scholes R.J., Mace G.M., Turner W., Geller G.N., Jürgens N., Larigauderie A., Muchoney D., Walther B.A., Mooney H.A. (2008) Toward a Global Biodiversity Observing System. *Science*, 321, 1044-1045.
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. (2014) 4^e édition des *Perspectives mondiales de la diversité biologique*. Montréal, 155 pp.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity (Eds: S. Hennige, J.M. Roberts & P. Williamson). Montreal, *Technical Series No. 75*, 99 pp.
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010) 3^e édition des *Perspectives mondiales de la diversité biologique*. Montréal, 94 pp.
- Seppelt R., Dormann C.F., Eppink F.V., Lautenbach S., Schmidt S. (2011) A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 48, 630-636.
- Sutherland W.J., Aveling R., Brooks T.M. et al. (2014) A horizon scan of global conservation issues for 2014. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 15-22.
- Sutherland W.J., Clout M., Cote I.M. et al. (2010) A Horizon Scan of Global Conservation Issues for 2010. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 1-7.
- Sutherland W.J., Woodroof H.J. (2009) The need for environmental horizon scanning. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 523-527.
- TEEB (2010) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Pushpam Kumar (Ed.) London and Washington, Earthscan, 425pp.
- Tittensor D.P., Walpole M., Hill S.L.L. et al. (2014) A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 346, 241-244.
- Turner W. (2014) Sensing biodiversity. *Science*, 346, 301-302.

Pour aller plus loin, voir aussi les prospectives de l'Institut écologie et environnement du CNRS :
www.cnrs.fr/inee/presentation/publications.htm

ANNEXE : LISTE DES CONTRIBUTEURS

PARTICIPANTS AUX GROUPES DE TRAVAIL DE 2013

Groupe de travail «valeurs et acteurs», 14 février 2013

Martine Antona, CIRAD (CS FRB)
Isabelle Doussan, INRA (CS FRB)
Emmanuelle Gonzalez, CDC Biodiversité
Ghislaine Hierso, Association Orée
Gilles Landrieu, Parcs nationaux de France
Hélène Leriche, Association Orée
Didier Rousseau, Jardins botaniques de France et des pays francophones
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)

Groupe de travail «systèmes d'information et de connaissances», 26 février 2013

Denis Couvet, MNHN (CS FRB)
Sophie Danvy, Institut français du cheval et de l'équitation
Maëlle Decherf, Fédération des Conservatoires botaniques nationaux
Aurélié Delavaud, FRB
Hélène Gross, ACTA, le réseau des instituts techniques des filières animales et végétales
Pierre-Edouard Guillain, MEDDE
Bénédicte Herbinet, FRB
Guy Landmann, G.I.P. ECOFOR
Jean-Pierre Lebrun, Confédération paysanne
François Letourneux, Comité français de l'UICN, Président du COS
Nirmala Séon-Massin, ONEMA
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)

Groupe de travail «réponses et adaptations», 5 mars 2013

Aude Bernard-Brunel, EpE
Bénédicte Herbinet, FRB
Michel Hignette, Union des Conservateurs d'aquariums
Cécile Joucan, LVMH
Murièle Millot, MEDDE
François Lefèvre, INRA (CS FRB)
Ophélie Ronce, CNRS
Françoise Siclet, EDF
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)
Christine Sourd, WWF France

Groupe de travail «pressions et risques », 18 mars 2013

Christian Béranger, MEDEF
Franck Courchamp, CNRS (CS FRB)
Cécile Joucan, LVMH
Elise Leclercq, GNIS
François Letourneux, Comité français de l'UICN, Président du COS
Serge Martin-Pierrat, Forum de l'agriculture raisonnée respectueuse de l'environnement
Murièle Millot, MEDDE
Mathieu Sarasa, Fédération nationale des chasseurs
Nirmala Séon-Massin, ONEMA
Françoise Siclet, EDF
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)
Pierre Watremez, Agence des aires marines protégées

Groupe de travail «fonctions et services», 18 mars 2013

Hugo Anest, Association Orée
Jean-Pierre Arnauduc, Fédération nationale des chasseurs
Gilles Benest, France Nature Environnement
Emmanuelle Gonzalez, CDC Biodiversité
Sandra Lavorel, CNRS (CS FRB)
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)

Groupe de travail «innovations et actions», 12 juin 2013

Hugo Anest, Association Orée
Sébastien Barot, IRD
Bernard Bodo, MNHN (CS FRB)
Nathalie Frascaria-Lacoste, AgroParisTech
Emmanuelle Gonzalez, CDC Biodiversité
Hélène Gross, ACTA, le réseau des instituts techniques des filières animales et végétales
Cécile Joucan, LVMH
Julie Labatut, INRA
Jean-Pierre Lebrun, Confédération paysanne
Jean-François Lesigne, RTE
Guillaume Sainteny, École Polytechnique
Jean-François Silvain, IRD (CS FRB)
Simon Tillier, MESR

CITATION

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (2015), Prospective scientifique 2015 pour la recherche française sur la biodiversité. Série FRB, Reflexions stratégiques et prospectives. Ed. Jean-François Silvain et Flora Pelegrin, 56 pp.

© FRB 2015

ISBN : 979-10-91015-12-7 (imprimé)

ISBN : 970-10-91015-13-4 (PDF)

DIRECTEUR DE PUBLICATION : Pierre-Edouard Guillain

DESIGN GRAPHIQUE : Mathilde Letard

PHOTOGRAPHIES :

Couverture : © naturexpose.com/Olivier Dangles et François Nowicki,

© INRA Marc Vincent, © CNRS Photothèque/Solène Derrien,

© CNRS Photothèque/IRD/Erwan Amice, © CNRS Photothèque/Grégory

Loucougaray, © CNRS Photothèque/SBR/Thierry Cariou

© CNRS Photothèque/Fabrice Monna, © CNRS Photothèque/Observatoire

de Rennes/INRA/Violette Le Féon, © CNRS Photothèque/Hervé Quénoel,

© INRA Sylvie Toillon

p. 6 © CNRS Photothèque/Observatoire de Rennes/INRA - Thomas Delattre

p. 8, p. 26 © CNRS Photothèque - Cyril Frésillon

p. 15, p. 47 © CNRS Photothèque - Claude Delhay

p. 17 © INRA - Sophie Normant

p. 21 © CNRS Photothèque / OTELo - Pascal Robert

p. 31 © CNRS Photothèque/Biogéosciences-Dijon - Fabrice Monna

p. 40 © CNRS Photothèque - Hubert Raguet

p. 45 © FRB/CESAB-Groupe de travail NETSEED

p. 52 © INRA - Christophe Maitre

IMPRIMÉ PAR :

Fondation pour la recherche sur la biodiversité

Fondation de coopération scientifique, la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité a pour mission de favoriser aux niveaux national, européen et international les activités de recherche sur la biodiversité, en lien étroit avec les enjeux des différents acteurs de la société. Ses fondateurs sont huit établissements publics de recherche (BRGM, CIRAD, CNRS, IFREMER, INRA, IRD, IRSTEA, MNHN) et LVMH. Document réalisé avec le soutien du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

FRB

195, rue Saint-Jacques
75005 Paris

contact@fondationbiodiversite.fr
www.fondationbiodiversite.fr



Les membres
fondateurs
de la FRB :



LVMH

