

Introduction

Les conséquences écologiques et sociétales de la perte de biodiversité

Michel LOREAU¹, Andy HECTOR² et Forest ISBELL³

¹ *Station d'écologie théorique et expérimentale, CNRS, Moulis, France*

² *Université d'Oxford, Oxford, Royaume-Uni*

³ *Université du Minnesota, Saint Paul, États-Unis*

Parmi les caractéristiques distinctives et fascinantes des systèmes écologiques, l'on trouve leur extraordinaire complexité. Un écosystème est souvent composé de milliers d'espèces différentes qui interagissent d'innombrables façons à l'échelle d'un seul hectare. Chaque espèce est composée de nombreux individus qui varient en fonction de leurs différences génétiques et de leur expérience particulière de l'environnement local. Ces systèmes locaux complexes sont fortement connectés les uns aux autres, et s'agrègent en entités de plus en plus grandes, de l'échelle du paysage à celle de l'ensemble de la biosphère, où il devient évident qu'ils exercent une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques de notre planète. Comment étudier des systèmes d'une telle complexité ?

Pendant la seconde moitié du XX^e siècle, deux approches de plus en plus divergentes des systèmes écologiques se sont développées au sein de l'écologie, qui ont progressivement donné naissance à deux disciplines largement distinctes : l'écologie des communautés et l'écologie des écosystèmes. Une communauté est généralement définie comme un ensemble d'espèces qui vivent ensemble dans un espace donné. L'écologie des communautés se concentre traditionnellement sur la diversité des espèces : quelles forces exogènes et endogènes conduisent à des communautés plus ou moins diversifiées ? De quelle

façon les interactions entre espèces restreignent-elles le nombre d'espèces pouvant co-exister ? Quels schémas émergent de ces interactions ? Un écosystème est la totalité du système constitué par les facteurs biotiques et abiotiques qui interagissent dans un lieu donné. Le concept d'écosystème est plus large que celui de communauté, parce qu'il inclut un large éventail de processus biologiques, physiques et chimiques qui relient les organismes à leur environnement. L'écologie des écosystèmes, elle, se concentre traditionnellement sur le fonctionnement global des écosystèmes en tant qu'entités distinctes : comment l'énergie est-elle captée, transférée, pour finalement se dissiper dans différents écosystèmes ? Comment les nutriments limitants sont-ils recyclés, assurant ainsi le renouvellement des éléments matériels nécessaires à la croissance ? Quels facteurs et procédés contrôlent les flux énergétiques et matériels, de l'échelle locale à l'échelle mondiale ?

En un sens, l'écologie des communautés offre une perspective microscopique des écosystèmes en tant qu'elle en analyse les différentes parties, tandis que l'écologie des écosystèmes offre une perspective macroscopique de ces mêmes systèmes puisqu'elle les étudie comme un ensemble. Cependant, la distinction entre micro- et macroscopique ne s'applique pas nécessairement aux échelles spatiales que considèrent les deux disciplines. Bien que la majeure partie des écologues des communautés prenne bel et bien en compte les interactions entre espèces à petite échelle, un pan grandissant de cette discipline, que l'on nomme macroécologie, tient plutôt compte des modèles de diversité et de distribution d'espèces à de vastes échelles spatiales. L'accent mis sur les espèces – leur distribution, leur diversité et leurs interactions – est plus central pour l'approche communautaire que l'échelle spatiale prise en considération. De la même façon, l'écologie des écosystèmes étudie les flux énergétiques et matériels à diverses échelles spatiales. Ce qui distingue l'approche écosystémique, c'est le fait qu'elle étudie le système comme un tout, souvent sans prendre en compte les espèces qui le composent.

À l'heure où l'humanité s'élève au rang de force biogéochimique mondiale majeure et où la perspective d'une crise écologique mondiale se dessine, il est important de prendre du recul et de se demander si l'étude séparée des communautés et des écosystèmes est la meilleure voie à suivre. Les impacts des activités humaines sur l'environnement comprennent la destruction et la fragmentation des habitats naturels, la pollution, le changement global, la surexploitation des ressources biologiques, l'homogénéisation du biote et la perte de biodiversité. Ces impacts affectent indistinctement les espèces et les écosystèmes. En outre, ils interagissent les uns avec les autres, ce qui peut entraîner des effets synergiques. Par exemple, le changement global est susceptible de causer une perte de biodiversité massive supplémentaire. Cette perte de biodiversité est à son tour susceptible de réduire la résistance des écosystèmes aux effets du changement global, avec de possibles conséquences en retour sur le système climatique lui-même. Les espèces, les communautés et les écosystèmes ont toujours été inextricablement liés, mais les perturbations majeures générées par l'homme dans la période actuelle rendent cette réalité encore plus

évidente. Une approche synthétique de l'écologie, qui intègre les populations, les communautés et les écosystèmes, est nécessaire pour répondre de façon appropriée à la crise écologique mondiale dans laquelle nous entrons.

L'écologie des communautés est un domaine de recherche dynamique dans lequel les connaissances se sont rapidement accumulées au cours des 60 dernières années environ, en se fondant largement sur une approche hypothético-déductive moderne. Cependant, les théories et l'élaboration d'hypothèses ont souvent dépassé les études empiriques et les tests d'hypothèses en écologie des communautés, ce qui entrave le progrès scientifique. En conséquence, cette sous-discipline a peu de « lois » ou de généralisations solides, à l'exception de certains modèles empiriques à grande échelle tels que la relation aire-espèce (Rosenzweig 1999). En revanche, l'écologie des écosystèmes est une sous-discipline qui a traditionnellement une solide base empirique. Ses théories sont largement basées sur des généralisations inductives à partir de mesures de terrain, avec comparativement peu d'hypothèses fondées sur la théorie et de tests expérimentaux. Il n'y a aucun doute que l'approche écosystémique a joué un rôle clé dans le développement de notre compréhension de la biogéochimie globale du système Terre et des changements environnementaux globaux actuels. Pourtant, malgré ces accomplissements, un certain nombre d'auteurs ont remis en question sa vision relativement statique des systèmes écologiques et même sa pertinence scientifique, appelant à un rajeunissement fondamental de la discipline (O'Neill 2001). Le renforcement de la théorie, des tests expérimentaux et de leurs interactions, ainsi que le fait de prêter attention à la dynamique et à la complexité écologiques sont les ingrédients clés d'un tel rajeunissement.

Dans l'ensemble, l'écologie des communautés et l'écologie des écosystèmes offrent deux perspectives sur des systèmes écologiques complexes qui présentent des forces et des faiblesses largement complémentaires. Les deux disciplines ont été remises en question, et chacune pourrait tirer profit de la perspective développée par l'autre. Développer de nouvelles théories sur les interactions entre les espèces et entre celles-ci et leur environnement dans l'objectif ultime de prévoir le fonctionnement et les services des écosystèmes permettrait à l'écologie des communautés de se concentrer sur des questions à la fois importantes sur le plan scientifique et pertinentes sur le plan social. L'intégration de la diversité, de la complexité et de la nature dynamique des communautés dans sa vision du fonctionnement des écosystèmes permettrait à l'écologie des écosystèmes d'être plus vivante et de faire des prédictions plus fiables, quoique moins certaines. Il est de plus en plus clair que la fusion de ces deux perspectives est nécessaire à la fois pour garantir la poursuite du progrès scientifique et pour fournir à la société les moyens scientifiques de faire face aux défis environnementaux croissants (Loreau 2010a, 2010b). Une écologie plus intégrative doit également inclure l'homme, non pas seulement en tant que force extérieure perturbant les écosystèmes, mais en tant que partie intégrante d'une biosphère qui interagit avec ses autres composants.

Le nouveau domaine de recherche sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes (BFE), qui est apparu dans les années 1990 et s'est étendu au cours des dernières décennies, a largement contribué à faire avancer l'écologie dans cette direction. L'idée selon laquelle la diversité végétale améliore la production de biomasse végétale est fondamentale en écologie, remontant au principe darwinien de divergence (McNaughton 1993 ; Hector et Hooper 2002), mais cette idée n'a pas pris pendant plus d'un siècle en raison du succès de la loi de Liebig sur le minimum et du manque d'une théorie rigoureuse et de protocoles expérimentaux adaptés aux sciences agricoles. L'agriculture s'est progressivement tournée vers un nouveau modèle fondé sur la production industrielle d'engrais artificiels, la mécanisation et l'utilisation de monocultures de variétés sélectionnées artificiellement. Ce n'est que lorsque les conséquences écologiques néfastes du modèle industriel moderne, et en particulier la menace de la perte de biodiversité, ont commencé à être largement reconnues à la fin du siècle dernier qu'est apparu un intérêt pour les effets de la perte de biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes. Cet intérêt s'est ensuite rapidement propagé, a pénétré le champ de l'écologie expérimentale et théorique, et a conduit à l'émergence d'un nouveau domaine de recherche à l'interface entre écologie des communautés et écologie des écosystèmes (Loreau *et al.* 2001, 2002, 2010a ; Hooper *et al.* 2005 ; Naeem *et al.* 2009 ; Cardinale *et al.* 2012 ; Tilman *et al.* 2014).

L'intérêt pour cette question est né en grande partie de préoccupations pratiques concernant les conséquences écologiques potentielles de la perte actuelle de biodiversité causée par l'impact accru des activités humaines sur les écosystèmes, qu'ils soient naturels ou gérés. Il est de plus en plus admis que les écosystèmes permettent à la société d'accéder à un large éventail de « services écosystémiques » (Millennium Ecosystem Assessment 2005) ou de « contributions de la nature à l'homme » (Diaz *et al.* 2018) essentiels au bien-être humain et au développement durable. Ces services ou contributions découlent du fonctionnement normal des écosystèmes, ce qui soulève l'importante question de savoir si les écosystèmes appauvris peuvent d'une certaine manière fonctionner de façon moins efficace que les systèmes plus riches en espèces dont ils sont issus, et perdre ainsi progressivement leur capacité à rendre des services écosystémiques aux sociétés humaines. Cependant, au-delà de cette motivation éminemment pratique, le nouveau domaine de recherche BFE a joué un rôle transformateur beaucoup plus vaste et profond en écologie.

L'un de ses principaux avantages a été de favoriser l'intégration de l'écologie des communautés et de l'écologie des écosystèmes. L'écologie a traditionnellement considéré, implicitement ou explicitement, la diversité des espèces comme un épiphénomène déterminé par une combinaison de facteurs environnementaux abiotiques (tels que la température, les précipitations et la fertilité du sol), de processus écosystémiques eux-mêmes déterminés par ces facteurs abiotiques (tels que la productivité, la biomasse et le recyclage des nutriments) et d'interactions biotiques au sein des communautés (telles que la com-

pétition et la prédation). Ce principe a été partagé par l'écologie des communautés et l'écologie des écosystèmes. L'écologie des communautés s'est historiquement consacrée à l'explication des motifs et des processus de coexistence et de diversité des espèces. L'écologie des écosystèmes a souvent ignoré la diversité des espèces comme s'il s'était agi d'une sorte de « bruit de fond » sans rapport avec le fonctionnement des écosystèmes. Les deux disciplines ont ainsi considéré la diversité des espèces de façon contrastée, ce qui explique leur divergence historique. Cependant, l'une et l'autre ont partagé l'hypothèse de base selon laquelle la diversité des espèces est un épiphénomène. Le nouveau domaine de recherche BFE a renversé ce principe central en considérant la biodiversité – en particulier la diversité des espèces et la diversité génétique – comme un moteur du fonctionnement des écosystèmes (Naeem 2002 ; Loreau 2010b). Ce simple changement de paradigme a eu des conséquences bien plus profondes qu'il n'y paraît à première vue. Si la biodiversité affecte le fonctionnement des écosystèmes, les écologues des écosystèmes ne peuvent plus ignorer la dynamique de la biodiversité au sein des écosystèmes. De la même façon, les écologues des communautés ne peuvent plus ignorer les conséquences potentielles de la biodiversité sur son propre maintien à travers le fonctionnement des écosystèmes. La base de la séparation historique des deux disciplines s'évanouit alors, même si cela peut prendre un certain temps avant que les deux parties reconnaissent tout ce qu'implique ce changement.

Le domaine de recherche BFE a également contribué à la transformation de l'écologie à d'autres titres. Historiquement, l'écologie a eu la fâcheuse tendance de déconnecter recherche empirique et recherche théorique, avec une profusion de données empiriques mal généralisées et une profusion égale de théories mal testées. En raison de cette déconnexion, il y eut peu de tentatives pour résoudre les controverses par la recherche d'un consensus au sein de la communauté scientifique, ce qui provoqua des changements périodiques dans les sujets de recherche à la mode. Dans un tel contexte, le processus scientifique par lequel s'est développé le domaine de recherche BFE a été tout à fait remarquable. En premier lieu, ce domaine de recherche s'est largement appuyé sur des expériences contrôlées, qui à cette époque étaient encore relativement rares en écologie. Depuis les premières expériences phares du domaine BFE dans les années 1990 (Naeem *et al.* 1994 ; Tilman *et al.* 1997a ; Hector *et al.* 1999), plusieurs centaines d'expériences ont été réalisées dans ce domaine pour évaluer la reproductibilité des résultats obtenus précédemment, déterminer leur niveau de généralité, ou démêler les mécanismes qui sous-tendent les effets de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes (Cardinale *et al.* 2012 ; O'Connor *et al.* 2017). Dans un second temps, la théorie s'est rapidement développée en interaction avec les expériences (Tilman *et al.* 1997b ; Loreau 1998, 2000) et a permis une nouvelle et précieuse approche de l'interprétation et de la généralisation des résultats des expériences BFE. La théorie a joué un rôle central dans la résolution des premières controverses scientifiques qui ont surgi au sujet de l'interprétation des expériences BFE, parallèlement à la reconnaissance du besoin de répéter les expériences et traitements expérimentaux (Huston 1997).

Les controverses scientifiques résultent souvent d'un manque de clarté du cadre théorique, d'un manque d'outils appropriés, ou d'un manque de preuves empiriques suffisantes pour faire le tri entre différentes hypothèses concurrentes clairement identifiées. Les controverses à propos du domaine de recherche BFE n'ont pas fait exception à cette règle, combinant ces trois problèmes. La théorie a aidé à résoudre ces controverses à deux égards. En premier lieu, elle a permis de clarifier le cadre conceptuel dans lequel les expériences BFE étaient conçues et interprétées, ce qui a permis d'établir un consensus sur les mécanismes et résultats possibles de ces expériences (Loreau *et al.* 2001). Ensuite, elle a aidé à concevoir une nouvelle méthodologie de partition additive, inspirée par (bien que conceptuellement différente de) l'équation de Price en génétique évolutive, pour distinguer les deux principales classes de mécanismes sous-tendant les résultats des expériences BFE (Loreau et Hector 2001). L'application de cette méthodologie à de nombreuses expériences BFE a révélé que les effets positifs de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes étaient généralement induits par une combinaison des deux classes de mécanismes (Cardinale *et al.* 2012), mais la complémentarité fonctionnelle entre les espèces tend à jouer un rôle de plus en plus important à mesure qu'augmentent la biodiversité et le temps après la manipulation expérimentale (Loreau et Hector 2001 ; Cardinale *et al.* 2007 ; Fargione *et al.* 2007 ; Reich *et al.* 2012). Le lien étroit existant entre la théorie et les expériences est un héritage majeur du domaine de recherche BFE. Les expériences ont permis de construire une théorie orientée davantage vers la pratique, et la théorie a permis d'analyser et d'interpréter les expériences de façon plus efficace. Ce constant aller-retour a permis de parvenir à des conclusions claires mais équilibrées, et a ainsi offert un terrain sain pour la recherche de consensus et les études futures.

Comme beaucoup de nouveaux domaines de recherche fructueux, le domaine BFE n'est pas resté confiné dans ses limites scientifiques initiales, mais a élargi sa portée pour englober un large éventail de questions fondamentales en écologie, telles que le fonctionnement des réseaux trophiques (Thébault et Loreau 2003 ; Duffy *et al.* 2007), la propagation de maladies (Keesing *et al.* 2006) et la dynamique spatiale des métacommunautés (Loreau *et al.* 2003), tout en ravivant l'intérêt porté à la relation entre diversité et stabilité des systèmes écologiques. Les progrès réalisés sur la relation diversité-stabilité ont été particulièrement significatifs compte tenu de l'histoire, longue et controversée, de cette question en écologie (Pimm 1984 ; McCann 2000 ; Ives et Carpenter 2007). Deux caractéristiques décisives distinguent les nouvelles approches théoriques et expérimentales de la relation diversité-stabilité développées dans le cadre du programme de recherche BFE des approches précédentes : premièrement, ces nouvelles approches ont explicitement distingué et relié les propriétés de stabilité au niveau de la population et au niveau agrégé de la communauté ou de l'écosystème ; deuxièmement, elles ont abandonné les hypothèses traditionnelles selon lesquelles l'environnement est stable et les populations et écosystèmes atteignent un équilibre pour incorporer explicitement les réponses dynamiques de la population aux fluctuations environnementales. En conséquence, nous avons maintenant

une compréhension bien meilleure et plus complète de la diversité des relations diversité-stabilité qui peuvent apparaître à différents niveaux d'organisation et des mécanismes qui les génèrent (Loreau et de Mazancourt 2013).

Enfin, son impulsion initiale ayant été donnée par la pertinence sociétale des questions abordées, la recherche BFE a également eu un fort impact sur la gestion et la politique de la biodiversité. Cela est dû au fait qu'elle a touché et attiré des écologues appliqués ainsi que des économistes et des spécialistes en sciences sociales travaillant sur des questions environnementales (Naeem *et al.* 2009). Cela a permis au domaine de s'étendre encore davantage et d'influencer la politique. Ce domaine a apporté en particulier des connaissances scientifiques essentielles pour appuyer l'évolution lente mais constante vers des pratiques plus durables dans les secteurs agricole et forestier, et a joué un rôle important dans les grandes évaluations internationales telles que l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (2005) et la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

Cet ouvrage témoigne de l'extraordinaire succès scientifique et des progrès de la recherche BFE au cours des trois dernières décennies. Il offre une vaste synthèse des connaissances scientifiques actuelles sur les conséquences écologiques et sociétales de la perte de biodiversité, destinée à un large public d'étudiants de premier cycle supérieur, d'étudiants de troisième cycle, et de personnel universitaire et de recherche. Bien qu'aucun ouvrage ne puisse jouer tous les rôles à la fois, nous espérons que celui-ci fournira une vue d'ensemble actualisée du domaine de recherche et servira de manuel pour soutenir et accompagner l'enseignement dans ce domaine. À cet égard, cet ouvrage diffère des ouvrages précédents sur la BFE (Loreau *et al.* 2002 ; Naeem *et al.* 2009), dont l'objectif principal était de fournir des synthèses et des perspectives de recherche.

Le présent ouvrage est composé de cinq parties. La première fait office d'introduction générale aux notions de biodiversité et d'écosystème et aux nombreux autres concepts auxquels il sera fait référence tout au long de l'ouvrage. Le premier chapitre plante le décor de cet ouvrage, en donnant un large aperçu des changements majeurs de la biodiversité qui se sont produits par le passé, qui se produisent actuellement et qui sont susceptibles de se produire à l'avenir. Le chapitre 2 explique plus en détail ce qu'est la biodiversité et comment la mesurer, ce qui s'avère être une question bien plus complexe que la plupart des gens ne l'imaginent. Le chapitre 3 explique ce que sont les écosystèmes, comment ils sont façonnés par des facteurs abiotiques et biotiques, comment ils évoluent dans le temps et l'espace, comment ils fonctionnent, et comment ils affectent l'homme et sont affectés par lui.

La partie 2 de l'ouvrage passe en revue les principes et résultats fondamentaux de la recherche BFE, c'est-à-dire la façon dont la biodiversité affecte le fonctionnement des

écosystèmes. Comme mentionné précédemment, la recherche BFE a joué un rôle transformateur en écologie, en liant étroitement théorie et expériences. Les deux premiers chapitres de cette partie sont le reflet de cette évolution. Le chapitre 4 fournit les fondements théoriques de la recherche BFE. Il explique pourquoi la biodiversité a généralement tendance à favoriser le fonctionnement des écosystèmes à partir de la théorie fondamentale de la niche, et comment cette prédiction peut être étendue à des écosystèmes plus complexes, qui présentent de multiples niveaux trophiques et sont hétérogènes dans l'espace et dans le temps. Le chapitre 5 passe en revue les preuves expérimentales de la façon dont la biodiversité affecte le fonctionnement de l'écosystème. Il explique pourquoi les expériences sont un outil essentiel pour étoffer les connaissances en écologie, comment elles ont mis à l'épreuve la théorie BFE et donné des indications concernant certains mécanismes sous-jacents, et comment elles ont permis l'extension de la théorie classique. Le chapitre 6 montre comment les connaissances fondamentales acquises par la théorie et les expériences peuvent être utilisées pour concevoir et interpréter les études d'observation sur le terrain. En définitive, la théorie et les expériences sont utiles en tant qu'elles nous aident à mieux comprendre le monde réel. Démêler les relations entre les différentes dimensions de la biodiversité, les conditions environnementales en constante évolution, le contexte de gestion environnementale et le fonctionnement des écosystèmes fait cependant surgir de sérieux défis méthodologiques dans des conditions naturelles. Ce chapitre examine les avantages, les défis et les résultats des analyses des données d'observation, ainsi que les façons possibles d'améliorer la conception et l'analyse des études d'observation.

La partie 3 de cet ouvrage passe en revue les connaissances actuelles sur la façon dont la biodiversité affecte la stabilité des écosystèmes. Comme mentionné précédemment, la relation entre la diversité et la stabilité des systèmes écologiques a été un sujet controversé dans l'histoire de l'écologie. Il est remarquable que la recherche BFE ait été en mesure d'amener de nouvelles perspectives sur ce sujet et de résoudre en grande partie le débat historique en un temps relativement court. Encore une fois, le fait de combiner théorie et expériences a joué un rôle décisif dans ce progrès. C'est pourquoi cette partie adopte la même structure que la précédente. Le chapitre 7 examine d'abord les avancées théoriques fondamentales ayant permis un tel progrès. Il apporte une clarification concernant les diverses significations de la stabilité – un concept aux multiples facettes –, montre comment ses divers composants sont liés entre eux, examine les différents mécanismes expliquant l'effet stabilisateur de la biodiversité sur la stabilité des écosystèmes, et cherche à déterminer comment les relations diversité-stabilité peuvent être étendues dans l'espace. Le chapitre 8 présente ensuite un examen approfondi des preuves expérimentales disponibles pour ces prédictions théoriques. Il montre que les expériences ont largement confirmé à la fois les prédictions principales et les mécanismes identifiés par la nouvelle théorie. Enfin, le chapitre 9 dresse un bilan des preuves concernant la direction des relations biodiversité-stabilité et de leurs mécanismes sous-jacents dans les écosystèmes naturels,

en tenant compte à la fois des études d'observation le long de gradients naturels de biodiversité et des expériences sur les effets des changements globaux évaluant la façon dont les facteurs environnementaux influencent la stabilité temporelle des écosystèmes.

La partie 4 de cet ouvrage traite de certaines conséquences économiques et sociales de la recherche BFE, et en particulier de la façon dont la biodiversité affecte la fourniture de services écosystémiques aux sociétés humaines. Le chapitre 10 dresse la liste des multiples avantages connus de la diversité génétique des cultures et des espèces dans les domaines agricole et forestier, et avance l'idée que la biodiversité est en mesure de soutenir une nouvelle révolution verte dans les écosystèmes gérés. Le chapitre 11 examine les liens existant entre la biodiversité et la santé humaine. Il montre que la nouvelle ère de l'Anthropocène réorganise le grand jeu écologique et évolutif entre les microbes, les hôtes, les non-hôtes et les humains, entraînant de nouvelles pandémies à l'instar de la récente épidémie de Covid-19, et affirme que pour faire face aux futures pandémies, il nous faudra prendre conscience du fait que la santé humaine est intimement liée à la biodiversité. Le chapitre 12 offre une feuille de route pour l'évaluation économique de la biodiversité et des services écosystémiques. Il cherche à clarifier ce qu'est l'évaluation économique (et ce qu'elle n'est pas) et à offrir une brève introduction aux méthodes d'évaluation existantes, en soulignant leurs applications ainsi que leurs limites.

La cinquième et dernière partie de cet ouvrage propose une vue d'ensemble de l'avenir de la biodiversité sur notre planète en constante évolution. Le chapitre 13 met l'accent sur les liens et les relations de cause à effet et les rétroactions existant entre les changements de la biodiversité et ceux du climat – qui constituent les deux grandes crises environnementales globales actuelles. Il décrit la façon dont la vie sur Terre répond aux changements globaux autant dans les écosystèmes terrestres qu'aquatiques, explique comment cette réponse est vouée à affecter le fonctionnement des écosystèmes et comment les sociétés humaines peuvent affronter cette double crise environnementale. Le chapitre 14 montre comment la biodiversité et les sociétés humaines sont liées de façon inextricable par des rétroactions à plusieurs niveaux, qui altèrent la prise de décisions, ont un impact sur la production agricole, influencent le bien-être, modifient les groupes de revenus et façonnent les écosystèmes. Il affirme qu'il est essentiel de tenir compte de ces rétroactions pour concevoir des politiques et des stratégies de gestion de la biodiversité efficaces. Enfin, le chapitre 15 nous rappelle que la protection et la restauration de la biodiversité sont cruciales pour garantir la pérennité du fonctionnement, de la stabilité et des services écosystémiques, et passe en revue les mérites et les limites de deux stratégies de conservation très répandues : les aires protégées et la restauration écologique. Il explique également comment la protection de la biodiversité peut contribuer simultanément au fonctionnement des écosystèmes et aux services qu'ils rendent, et comment augmenter les niveaux de la biodiversité dans des schémas de restauration peut accroître leur efficacité.

Nous espérons que le contenu de cet ouvrage encouragera les étudiants et chercheurs en début de carrière à faire progresser cette science et à appliquer ces connaissances pour conserver la biodiversité et les écosystèmes de notre planète.

Bibliographie

- Cardinale, B.J., Wright, J.P., Cadotte, M.W. *et al.* (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104, 18123–18128.
- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A. *et al.* (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59–67.
- Diaz, S., Pascual, U., Stenseke, M. *et al.* (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359, 270–272.
- Duffy, J.E., Cardinale, B.J., France, K.E., McIntyre, P.B., Thébault, E., Loreau, M. (2007). The functional role of biodiversity in ecosystems: Incorporating trophic complexity. *Ecology Letters*, 10, 522–538.
- Fargione, J., Tilman, D., Dybzinski, R. *et al.* (2007). From selection to complementarity: Shifts in the causes of biodiversity-productivity relationships in a long-term biodiversity experiment. *Proceedings of the Royal Society B*, 274, 871–876.
- Hector, A. and Hooper, R. (2002). Darwin and the first ecological experiment. *Science*, 295, 639–640.
- Hector, A., Schmid, B., Beierkuhnlein, C. *et al.* (1999). Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 286, 1123–1127.
- Hooper, D.U., Chapin, F.S., Ewel, J.J. *et al.* (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3–35.
- Huston, M.A. (1997). Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 110, 449–460.
- Ives, A.R. and Carpenter, S.R. (2007). Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 317, 58–62.
- Keesing, F., Holt, R.D., Ostfeld, R.S. (2006). Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters*, 9, 485–498.
- Loreau, M. (1998). Biodiversity and ecosystem functioning: A mechanistic model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95, 5632–5636.
- Loreau, M. (2000). Biodiversity and ecosystem functioning: Recent theoretical advances. *Oikos*, 91, 3–17.

- Loreau, M. (2010a). *From Populations to Ecosystems: Theoretical Foundations for a New Ecological Synthesis. Monographs in Population Biology*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Loreau, M. (2010b). Linking biodiversity and ecosystems: Towards a unifying ecological theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 49–60.
- Loreau, M. and Hector, A. (2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 72–76.
- Loreau, M. and de Mazancourt, C. (2013). Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 16(S1), 106–115.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P. *et al.* (2001). Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 294, 804–808.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P. (2002). *Biodiversity and Ecosystem Functioning: Synthesis and Perspectives*. Oxford University Press, Oxford.
- Loreau, M., Mouquet, N., Gonzalez, A. (2003). Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100, 12765–12770.
- McCann, K.S. (2000). The diversity–stability debate. *Nature*, 405, 228–233.
- McNaughton, S.J. (1993). Biodiversity and stability of grazing ecosystems. In *Biodiversity and Ecosystem Function*, Schulze, E.-D. and Mooney, H.A. (eds). Springer-Verlag, Berlin.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment. World Resources Institute, Washington, DC.
- Naeem, S. (2002). Ecosystem consequences of biodiversity loss: The evolution of a paradigm. *Ecology*, 83, 1537–1552.
- Naeem, S., Thompson, L.J., Lawler, S.P., Lawton, J.H., Woodfin, R.M. (1994). Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 368, 734–737.
- Naeem, S., Bunker, D.E., Hector, A., Loreau, M., Perrings, C. (2009). *Biodiversity, Ecosystem Functioning, and Human Wellbeing: An Ecological and Economic Perspective*. Oxford University Press, Oxford.
- O'Connor, M.I., Gonzalez, A., Byrnes, J.E.K. *et al.* (2017). A general biodiversity–function relationship is mediated by trophic level. *Oikos*, 126, 18–31.
- O'Neill, R.V. (2001). Is it time to bury the ecosystem concept? (With full military honors, of course!). *Ecology*, 82, 3275–3284.
- Pimm, S.L. (1984). The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307, 321–326.
- Reich, P.B., Tilman, D., Isbell, F. *et al.* (2012). Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science*, 336, 589–592.
- Rosenzweig, M.L. (1999). *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Thébault, E. and Loreau, M. (2003). Food-web constraints on biodiversity-ecosystem functioning relationships. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100, 14949–14954.
- Tilman, D., Knops, J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M., Siemann, E. (1997a). The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 277, 1300–1302.
- Tilman, D., Lehman, C.L., Thomson, K.T. (1997b). Plant diversity and ecosystem productivity: Theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 94, 1857–1861.
- Tilman, D., Isbell, F., Cowles, J.M. (2014). Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45, 471–493.