



Biodiversité et changement climatique

-

Impacts sur la biodiversité, les
écosystèmes français et les services
écosystémiques.

Recommandations pour
l'adaptation de la biodiversité



**Synthèse générale pour l'identification des besoins
d'adaptation des écosystèmes français dans l'optique de
réchauffements à +2 et +4°C**

REFERENCE

Soubelet H., Delavaud A., Goffaux R., Voirin S., Bérel M., 2023. *Biodiversité et changement climatique : Impacts sur la biodiversité, les écosystèmes français et les services écosystémiques. Recommandations pour l'adaptation de la biodiversité*. Synthèse de connaissances. Fondation pour la recherche sur la biodiversité

COORDINATION ET REDACTION

Hélène SOUBELET, Aurélie DELAUAUD et Robin GOFFAUX de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), Sarah VOIRIN de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique au sein du Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires et Maud BEREL de la Direction de l'eau et de la biodiversité du Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT DEB)

DESIGN GRAPHIQUE

François Junot

Cette synthèse s'inscrit dans les travaux de la Stratégie française énergie climat (SFEC) et vise en particulier à alimenter son volet sur l'adaptation au changement climatique. La Stratégie française énergie climat (SFEC) est la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation effective de la France au climat futur. Elle est constituée de la loi de programmation énergie climat (LPEC), de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC-3), du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3) et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2024-2033). La LPEC a été créée par la loi relative à l'énergie et au climat (LEC) de novembre 2019 (I de l'article L. 100-1 A).

Les objectifs de cette synthèse sont de réunir et vulgariser des éléments scientifiques sur les impacts du changement climatique sur la biodiversité et les services écosystémiques en France, y compris Outre-mer pour les niveaux de réchauffement climatique mondial +2 °C et +4 °C à horizon 2100.

Cette synthèse a été produite entre septembre 2022 et mars 2023.

Cette synthèse regroupe trois types de productions :

- Recensement des études pertinentes sur ces impacts
- Synthèse des connaissances
- Identification des lacunes de connaissances à combler

Cette synthèse intègre les recommandations de gestion et les lacunes de connaissances extraites de la littérature. Des tableaux de synthèse sont fournis en fin de document par type d'écosystème et pour différents niveaux de réchauffement.

Ce document constitue une première synthèse des connaissances sur les impacts actuels et futurs du changement climatique sur la biodiversité et les lacunes de connaissances associées, ainsi que des recommandations, en particuliers des recommandations législatives et réglementaires qui pourraient être proposées dans le cadre de la préparation de la LPEC.

Table des matières

COORDINATION ET REDACTION	2
Introduction.....	6
1 Les réponses actuelles et futures de la biodiversité au changement climatique.....	7
1.1 Modification des aires de répartition des espèces	7
1.1.1 Constats	7
1.1.2 Projections	8
1.2 Plasticité : adaptations physiologiques, ou comportementales	9
1.2.1 Constats	9
<i>Exemples chez les insectes</i>	10
<i>Exemples chez les vertébrés</i>	11
<i>Exemples chez les plantes</i>	12
<i>Exemples chez les organismes des sols</i>	12
<i>Ecosystèmes marins</i>	12
<i>Ecosystèmes terrestres</i>	14
1.2.2 Projections	14
1.3 Risque accru d'extinction locale, voire globale, pour les espèces à faible capacité de dispersion ou d'adaptation	15
Encadré 1 :	16
Exemple de l'impact de l'augmentation du CO ₂ (Arneth <i>et al.</i> , 2020)	16
Encadré 2 :	17
Impacts de l'augmentation de la fréquence et de la gravité	17
des phénomènes météorologiques extrêmes (Arneth <i>et al.</i> , 2020)	17
2 Le futur de la biodiversité sous pression climatique en France ou en Europe pour les scénarios +2° en 2050 (accord de Paris) et +4° en 2100 (scénario pessimiste)	17
2.1 Niveaux de réchauffement de référence auxquels la France devra s'adapter et à intégrer dans l'ensemble des politiques publiques	17
2.2 Augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes	20
2.3 Impacts différenciés en fonction des espèces	21
2.4 Impacts différenciés en fonction des biomes et des écosystèmes	22
2.4.1 Impacts sur la végétation du bassin méditerranéen	23
2.4.2 Impacts sur les écosystèmes tempérés	24
2.4.3 Impacts sur les forêts	24
2.4.4 Impacts sur les écosystèmes dulçaquicoles de surface	25
2.4.5 Impacts sur les écosystèmes marins	26
3 Impacts du changement climatique sur les services écosystémiques	27
3.1 Variabilité des rendements (service de production)	29
3.2 Perte du service de pollinisation	30
3.3 Accélération des émergences infectieuses ou parasitaires	31

3.4	Déstockage du carbone.....	31
4	Lacunes de connaissances	32
4.1	Améliorer les connaissances sur les potentiels plastiques des différentes espèces	32
4.2	Améliorer la connaissance sur les potentialisations croisées des différentes pressions et les impacts sur les services écosystémiques.....	32
4.3	Prendre en compte les risques de dépassement de seuils et de « point de bascule » des écosystèmes dans les modèles climatiques.....	32
4.4	Prendre en compte les rétroactions avec d'autres enjeux pour prioriser les actions.....	33
5	Recommandation pour l'adaptation des sociétés au changement climatique préservant la biodiversité.....	35
5.1	Prendre en compte conjointement le changement climatique et la protection de la biodiversité.....	35
5.2	Pallier le déficit d'adaptation naturelle de la biodiversité	36
5.3	Mettre en place une gestion adaptative favorisant le potentiel adaptatif	36
5.3.1	Populations sauvages.....	36
5.3.2	Agriculture	37
5.3.3	Pêche.....	39
5.3.4	Forêts.....	39
5.4	Diminuer les pressions anthropiques	40
5.5	Connaitre, comprendre et protéger la biodiversité	41
5.6	Faire évoluer les politiques	41
5.7	Eviter les écueils de l'atténuation du changement climatique terrestre	42
5.7.1	Les cultures bioénergétiques.....	46
5.7.2	La diffusion de particules dans l'atmosphère pour refroidir la terre (SRM pour <i>Solar Radiation Modification</i>).....	46
5.8	Privilégier les solutions fondées sur la nature.....	48
5.9	Recommandations pour la gestion adaptative des forêts	49
5.10	Donner la priorité aux mesures adaptatives face aux futurs changements climatiques dans les systèmes de production agricoles européens.....	50
5.11	Recommandations en matière législative et réglementaires pour protéger la biodiversité et augmenter sa résilience en contexte de changement climatique	51
Annexe : tableau de synthèse des impacts sur les écosystèmes français et les services écosystémiques associés, ainsi que sur les filières concernées, et les recommandations pour l'adaptation de la biodiversité pour des niveaux de réchauffement modérés (+2°C) ou importants (+4°C).....		54
Références bibliographiques.....		74

INTRODUCTION

Selon le rapport de l'ipbes compilant plus de 15 000 références scientifiques et auquel 150 experts de 45 pays ont contribué, le changement climatique n'est actuellement pas la première pression s'exerçant sur la biodiversité. Pour les milieux terrestres, il s'agit du changement d'usage des terres (principalement par l'agriculture) et pour les milieux marins il s'agit de l'exploitation des ressources naturelles (principalement par la pêche) (Díaz *et al.* 2019). Cependant, dans un contexte où les émissions de gaz à effet de serre ne diminuent pas, le changement climatique pourrait devenir la première pression sur la biodiversité dans les prochaines décennies (Scholes *et al.* 2010). Il n'existe pas de scénarios de référence pour la biodiversité.

Quel que soit le scénario climatique et socioéconomique, la proportion d'écosystèmes affectés par le changement climatique devrait augmenter au fil du temps (IPBES, 2018a).

Le changement climatique affecte déjà la biodiversité, les écosystèmes et les services fournis par la nature dont bénéficient les populations humaines. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et la diminution de leur capture par les écosystèmes due à leur dégradation entraînent une augmentation moyenne des températures, la diminution des précipitations et de la disponibilité en eau, augmentent l'acidification des océans ainsi que la survenue d'évènements climatiques extrêmes dont les sécheresses, les inondations et les incendies. Les impacts du changement climatique sur la biodiversité se produisent tant sur les plans structurel, compositionnel, et fonctionnel de la biodiversité, des gènes aux écosystèmes. Aux côtés des diminutions des diversités fonctionnelles et phénotypiques, il peut y avoir également des diminutions de la diversité des interactions biotiques (Gaüzère, 2022).

La biodiversité a des facultés d'acclimatation ou d'adaptation aux variations environnementales. Toutefois ces capacités sont limitées dans leur potentiel et/ou dans leur vitesse de réaction face à des variations plus ou moins rapides. Le changement climatique constitue une menace, car les espèces qui ne pourront pas s'y adapter ou se déplacer risquent l'extinction (Carvalho *et al.* 2010, Sinervo *et al.* 2010).

Un des messages clés de cette synthèse est que les liens entre biodiversité et climat sont faits de rétroactions respectives : la perte de biodiversité aggrave le changement climatique qui en retour dégrade la biodiversité qui perd ses facultés de réagir au changement climatique. Par exemple : la pression de sélection sur les espèces, entraînée par le changement climatique va réduire leur diversité génétique et ainsi leurs facultés d'adaptation à d'autres fluctuations de leur environnement. Et s'il y a ici un cercle vicieux évident, on peut aussi percevoir le cercle vertueux des co-bénéfices entre biodiversité et climat : la biodiversité n'en est pas seulement une victime, elle peut aussi être une solution pour atténuer le changement climatique et s'y adapter.

1 Les réponses actuelles et futures de la biodiversité au changement climatique

Face à un changement environnemental, les espèces ont plusieurs types de réponses non-exclusives : fuite ou migration vers des conditions favorables, adaptation par ajustement phénotypique ou plasticité, ou micro-évolution de traits qui leur permettent de survivre dans les nouvelles conditions (Thuillier 2017 in Lavorel *et al.* 2017). Si ces processus échouent, les espèces peuvent alors disparaître.

A l'échelle des communautés, les changements d'abondance de différentes espèces peuvent aussi être vus comme une réponse, modifiant la composition, la structure et les fonctions des écosystèmes.

Le réchauffement moyen d'un degré sur les 150 dernières années affecte déjà tous les niveaux d'organisation écologiques, des gènes aux écosystèmes en passant par les populations animales et végétales et se superposent à l'impact majeur des autres pressions anthropiques. Les conséquences pour la biodiversité sont donc des pertes de diversité génétique ce qui risque de limiter les capacités des espèces à s'adapter (Couvreur, comm. pers., Alsos *et al.* 2012, Couto Torres *et al.* 2016, Benitez-Benitez *et al.* 2022), une homogénéisation spatiale du vivant (IPBES, 2018b), des modifications des interactions des espèces entre elles et avec leur environnement abiotique (par exemple modifications des interactions consommateur-ressource, dans le cas de pertes de prédateurs supérieurs ou d'herbivores (Bellard *et al.* 2012, Damien & Tougeron, 2019)), la facilitation des invasions biologiques (Bellard *et al.* 2018). Par exemple, les récents changements climatiques ont probablement aggravé la perte et la fragmentation des habitats dans >18 % des écorégions terrestres, contenant plus de 50 % de espèces de vertébrés terrestres (Arneth *et al.*, 2020).

Attention, l'augmentation des températures n'est pas le seul facteur à prendre en compte : chez les papillons par exemple, la modification du régime des précipitations a un impact aussi important que les changements de températures en termes de dynamique des populations (Mills *et al.* 2017).

1.1 Modification des aires de répartition des espèces

1.1.1 Constats

Face à l'évolution des conditions de vie dans certains territoires due au changement climatique, des espèces qui n'y seront plus adaptées doivent atteindre de nouveaux territoires pour survivre, c'est-à-dire trouver des habitats au climat approprié (IPBES, 2018a). Le changement climatique a déjà affecté négativement la répartition de 47 % des mammifères terrestres et de 23 % des oiseaux (Díaz *et al.* 2019). Le changement climatique a déjà provoqué des déplacements de biomes et d'espèces vers les pôles et / ou en altitude pour les milieux terrestres (IPBES, 2018a) et en profondeur et / ou principalement vers le nord pour les milieux marins dans l'océan Atlantique nord (Kaimuddin *et al.* 2016). Le changement climatique n'affecte pas seulement les limites extérieures des aires de répartition, mais également leur zone cœur (Lenoir *et al.* 2008).

Les déplacements à différentes échelles spatiales s'accompagnent souvent de changements de niches écologiques, avec des conséquences sur la biodiversité :

- Installation permanente de vecteurs et pathogènes transportés par l'homme.
- Banalisation de la biodiversité du fait de l'arrivée d'espèces généralistes de milieu tempéré qui entrent en compétition avec les espèces spécialistes de ces milieux à forte contrainte climatique.
- Déplacement vers les pôles ou vers des altitudes plus élevées (Parmesan *et al.* 2003, Lenoir *et al.* 2020) des animaux ou des plantes pour lesquels on dispose de suivis réguliers ou de campagnes d'observations répétées au cours du temps (insectes, végétaux, oiseaux, poissons, etc.).
- Modification des communautés avec concentration des espèces dans les zones refuges et augmentation de la compétition des espèces entre elles en termes de concurrence pour les ressources ou de rapport prédateur / proies.

1.1.2 Projections

Là où il n'y a pas d'obstacles au mouvement, une température plus chaude entraînera probablement des déplacements continus vers les pôles et en altitude des espèces et des biomes entiers, avec des changements latitudinaux particulièrement rapides en raison du réchauffement plus important dans ces régions par rapport au reste de la terre. Ainsi, sous pression climatique les espèces se déplacent vers les pôles, avec un déplacement moyen décennal estimé de 17 km pour les taxons terrestres et 72 km pour les taxons marins. En région de montagne, d'importants mouvements ascendants ont été documentés (Arneth *et al.* 2020).

Même avec un réchauffement de 1,5 à 2°C, les aires de distribution de la majorité des espèces terrestres devraient se contracter de manière importante (Warren *et al.* 2019, Díaz *et al.* 2019, Nunez *et al.* 2019). Toutefois, passer de +2 à +1,5°C pourrait diminuer de 50% le nombre d'espèces menacées par le déplacement de leurs aires de répartition (Smith *et al.* 2018). Bien entendu, les effets sur les aires de répartition et la richesse spécifique sont plus prononcés dans les scénarios de fortes émissions (RCP 6 et 8.5). De nombreuses espèces animales et la plupart des espèces végétales ne pourront pas déplacer leur zone de distribution assez rapidement pour suivre le déplacement de leur zone climatique optimale (IPCC, 2014b). La réduction des aires de répartition sera plus importante pour les espèces endémiques, particulièrement sensibles (IPBES, 2018a). La tendance de déplacement d'espèces devrait se poursuivre et s'accroître au cours du siècle (Loarie *et al.* 2009).

Le changement climatique devrait aussi exacerber l'impact des espèces exotiques envahissantes dans de nombreux écosystèmes et aggraver le risque de propagation des maladies (IPBES, 2018a).

- ⇒ Le changement climatique exacerbera les défis de conservation si les espèces perdent les conditions climatiques appropriées dans les zones actuellement protégées et qu'aucun remplacement pour ces zones protégées ne peut être créé ou si des espèces à valeur économique subissent la double pression de la demande humaine et du climat.

Point d'alerte : *notre capacité à prédire correctement le déplacement de niche à l'échelle locale (Pincebourde & Casas, 2015) et à l'échelle de l'aire de distribution (Araujo et al. 2006) demande beaucoup d'informations souvent non disponibles.*

1.2 Plasticité : adaptations physiologiques, ou comportementales

1.2.1 Constats

L'adaptation peut avoir lieu aux échelles des populations, des individus ou des écosystèmes

1.2.1.1 *Adaptation des populations et des espèces*

Le changement climatique modifie les pressions de sélection dans les populations naturelles.

Des modèles théoriques reliant l'écophysiologie des espèces à leur démographie suggèrent que la vitesse d'évolution des traits dans les populations devra être très rapide pour faire face au changement climatique (Gienapp *et al.* 2013). Chez la plupart des espèces, la diversité génétique pour les traits de réponse au climat est élevée, ce qui permet des réponses évolutives rapides : en seulement 10 générations sélectionnées, la date de floraison de population de betteraves de l'Ouest de la France a pu être avancée au niveau des populations d'Afrique du Nord (van Dijk & Hauteeke, 2007). La sélection naturelle a façonné des adaptations au climat à toutes les échelles : par exemple à une échelle très locale, suite à un choc thermique, des colonies de corail rouge de faible profondeur activent rapidement des gènes de réponse au stress, alors que des colonies de profondeur plus élevée de quelques dizaines de mètres, où ces chocs sont moins fréquents, n'ont pas la même réponse (Haguener *et al.* 2013). Toutefois, les cas bien documentés d'évolution contemporaine en réponse au changement climatique restent rares.

En présence d'une désynchronisation de la ressource alimentaire ou du stade de végétation de l'habitat de certaines espèces par rapport à leur cycle de vie, l'adaptation est alors caractérisée par une modification de la phénologie des organismes (c'est à dire une modification de leur calendrier biologique). Il s'agit en particulier, d'évènements liés aux saisons comme une floraison et une maturité plus précoces chez de nombreuses plantes, des périodes de migration et de reproduction modifiées chez certains animaux, des modifications des périodes d'activités des insectes pollinisateurs, des éclosions plus précoces chez certaines espèces d'insectes, de poissons et d'oiseaux, des décalages des dates de migration, des décalages des dates de fructification des champignons du sol) :

- Désynchronisation entre des espèces interdépendantes comme les plantes et leurs pollinisateurs, ou des oiseaux insectivores et leurs proies au moment où leur progéniture doit être en pleine croissance.
- Nouvelles synchronies entre hôtes et parasites ou maladies, avec des impacts sensibles sur la production agricole et forestière.
- Décalage des dates de récoltes.

L'évolution adaptative en réponse au changement climatique peut être ralentie par diverses contraintes génétiques et démographiques. Les processus génétiques affectent les taux d'accroissement des populations, et l'effectif d'une population influe sur sa structure génétique. Le très lent remplacement des générations, comme c'est le cas pour les espèces qui ont des cycles de vie très lents telles que les arbres forestiers ou les grands vertébrés, ralentit l'évolution de ces populations. L'absence de variation génétique appropriée empêche l'adaptation chez certaines espèces très spécialisées, comme ces mouches tropicales qui ont perdu toute capacité de s'adapter à la sécheresse (van Heerwaarden *et al.* 2016).

Les taux de réponses plastiques diffèrent en fonction des groupes : l'étude de communautés de plantes, d'oiseaux, de reptiles et d'amphibiens, d'insectes et de champignons dans la réserve de Kivach en Russie montre des changements phénologiques très contrastés (Ovaskainen *et al.* 2013).

Cette plasticité peut être insuffisante si la demande excède la fenêtre de plasticité de l'organisme qui a évolué en réponse à une gamme de variation environnementale restreinte. Seule une réponse évolutive est alors à même de prendre le relais. En particulier, la plasticité sera en général insuffisante pour permettre aux organismes de s'adapter à des événements climatiques extrêmes ainsi qu'à des conditions climatiques extrêmement variables (Valladares *et al.* 2007). La plasticité est adaptative quand l'environnement altère les phénotypes dans la même direction que la sélection naturelle. Mais elle peut être maladaptative quand la réponse plastique diminue la survie ou la reproduction des individus. Il existe ainsi des phénomènes de mal adaptation documentés :

- Chez les plantes : altération de la croissance, réduction de l'activité photosynthétique, floraison insuffisamment précoce et/ou perturbations du système immunitaire.
- Chez des animaux ectothermes comme les poissons, les reptiles, et les amphibiens, la plasticité physiologique mobilisée pour s'adapter au changement climatique a déjà conduit à une augmentation des rythmes physiologiques de 20 % au cours des 20 dernières années (Seebacher *et al.* 2015). Des températures en augmentation déclenchent en effet une augmentation du rythme cardiaque, du métabolisme et des déplacements. Le rythme actuel et attendu du réchauffement va sans doute causer, dans certains cas, des stress physiologiques importants qui restent à évaluer.
- Au Canada, des écureuils terrestres de Colombie (*Spermophilus columbianus*) ont retardé leur émergence d'hivernation de 10 jours en 20 ans (un retard moyen de 0,47 jour par an) en raison d'une augmentation récente de chutes de neige tardives au printemps (figure 1, Lane *et al.* 2012). Du fait de ces émergences plus tardives, ces écureuils disposent d'une période plus courte pour se reproduire et accumuler des graisses avant l'hivernation suivante, avec pour résultat une chute de 20 % de la survie adulte. Une telle réponse plastique maladaptative peut affecter le devenir de la population.
- Certains coraux et populations de morues ont des caractéristiques et des traits de vie qui permettent dans certains cas de s'adapter à de nouvelles conditions environnementales (Hughes *et al.* 2003, Logan *et al.* 2014).

Il existe également des adaptations comportementales microclimatiques (voir en particulier l'exemple des insectes).

Exemples chez les insectes

Les insectes sont ectothermes et sont, à ce titre, fortement dépendant des conditions environnementales. Ils tolèrent une montée en température jusqu'à un certain seuil appelé température critique. De façon générale, cette température critique est particulièrement plastique. Ce seuil de tolérance augmente chez les générations issues de parents élevés dans des conditions plus chaudes (Schiffner *et al.* 2013). Toutefois, cette adaptation se réalise souvent au détriment d'autres fonctions, comme par exemple un taux de reproduction plus faible. L'adaptation présente donc un coût en termes de fitness, c'est-à-dire de capacité des individus

d'un certain genotype à se reproduire. Les insectes peuvent se thermoréguler notamment en accédant à des micro-habitats très diversifiés à l'échelle locale ou par leur couleur corporelle. Par exemple, les sauterelles qui vivent généralement en haut des tiges des plantes herbacées peuvent descendre le long des tiges pour trouver près du sol un microclimat plus favorable lors d'un réchauffement (Barton and Schmitz, 2009). C'est cet effet qui permet aux insectes de se développer dans les milieux extrêmes : certains papillons pondent leurs œufs sous les feuilles de certaines plantes qui sont plus fraîches que l'air ambiant lorsque la plante transpire (Potter *et al.* 2009 ; Woods, 2013). Cette thermorégulation comportementale dépend fortement de l'hétérogénéité microclimatique dans l'habitat. L'influence du réchauffement climatique sur cette mosaïque spatiale de microhabitats favorables et défavorables est encore mal connue. Toutefois, cette mosaïque peut totalement s'inverser sous l'effet du changement climatique, impliquant des bouleversements dans les distributions des insectes à l'échelle locale (Pincebourde *et al.* 2007 ; Barton *et al.* 2009). Le réchauffement peut aussi influencer la mosaïque thermique à micro-échelle. Par exemple, la température de surface d'une feuille d'arbre est hétérogène, mais le réchauffement tend à homogénéiser cette mosaïque, limitant d'autant plus la possibilité pour les petits organismes d'éviter les températures sub-létales à la surface des feuilles (Caillon *et al.* 2014).

Exemples chez les vertébrés

Les changements climatiques affectent les conditions environnementales auxquelles les vertébrés sont confrontés (température, précipitations, compétition et risque de prédation). Par conséquent, ces mécanismes physiologiques, initialement bénéfiques pour les organismes, peuvent s'avérer inadaptés aux nouvelles gammes de conditions environnementales engendrées par les changements climatiques (Angelier et Wingfield, 2013 in Lavorel *et al.* 2017). Certaines espèces s'adaptent à ces changements via une modification rapide de leurs stratégies de reproduction, migration et hivernage tandis que d'autres ne semblent pas disposer d'une telle capacité (Thomas *et al.* 2004 in Lavorel *et al.* 2017). Cette capacité dépend de plusieurs mécanismes, tels que la plasticité phénotypique et la microévolution en lien avec la variabilité génétique existante dans une population ou une espèce.

Le suivi pendant 47 ans d'une population de mésange charbonnière (*Parus major*) en Grande-Bretagne a montré un avancement de 14 jours dans la date moyenne de ponte du premier œuf (0,30 jour par an) (Charmantier *et al.* 2008). Ce décalage est fortement corrélé à l'augmentation de la température printanière dans la zone d'étude qui a induit un décalage de 14 jours dans le pic d'abondance des chenilles de la phalène brumeuse (*Operophtera brumata*), une des principales nourritures des poussins de mésange charbonnière. Des analyses détaillées basées sur des femelles ayant niché plusieurs fois au cours de la période d'étude ont démontré que la plasticité phénotypique expliquait une plus grande part de ce décalage que l'évolution adaptative. Les femelles de mésange utilisent des signaux de l'environnement (photopériode, température, précipitations, phénologie des arbres) pour ajuster leur calendrier de reproduction à des fluctuations annuelles des températures printanières, de manière à faire coïncider étroitement la demande en nourriture de leurs poussins et l'abondance de nourriture qui sera disponible plusieurs semaines après que chaque femelle se soit mise à pondre. Cette forte plasticité a permis une croissance de la population en dépit d'un réchauffement climatique continu, ce que n'ont pas réussi à faire d'autres populations de mésange charbonnière, aux Pays-Bas, où un décalage phénologique persistant entre les oiseaux et leurs proies a affecté négativement le succès de reproduction (Reed *et al.* 2013). Cet exemple illustre le fait que les

réponses des organismes au dérèglement climatique peuvent varier non seulement d'une espèce à l'autre mais aussi d'une population à l'autre au sein de la même espèce.

Exemples chez les plantes

Chez les plantes, l'adaptation au changement climatique repose sur certains processus tels que l'optimisation du cycle végétatif (plus ou moins long), l'optimisation des échanges eau-gaz carbonique (qui permet de favoriser soit la survie, soit la croissance), et l'optimisation de l'architecture de la plante, notamment leurs surfaces foliaires et racinaires (Tardieu 2017 in Lavorel *et al.* 2017). Ces choix d'optimisation permettent deux stratégies pour ces plantes, soit « dépensières », soit « conservatrices », un comportement trop « dépensier » menant à la mort de la plante et à l'interruption de sa lignée en cas de stress sévère. Avec un comportement trop conservateur, les plantes sont dominées lorsque les conditions ne sont pas extrêmes. Les plantes cultivées pour l'agriculture intensive ont été sélectionnées pour optimiser la stratégie « dépensière » avec des risques majeurs en cas de stress importants.

Exemples chez les organismes des sols

Les facteurs du changement climatique qui affectent la biodiversité des organismes des sols comprennent l'augmentation des événements extrêmes tels que la sécheresse et de fortes pluies (en abondance et fréquence), mais aussi des changements plus continus tels que des augmentations de pressions partielles de CO₂ et de température (Chotte 2017 in Lavorel *et al.* 2017). Il a été démontré que les champignons du sol ont retardé leur fructification de deux semaines en 170 ans sous pression climatique.

Des périodes étendues de sécheresses ont un impact négatif sur la plupart des groupes d'organismes du sol, par exemple en réduisant l'abondance et la diversité des protistes et des animaux plus grands. De fortes pluies peuvent favoriser l'abondance et la diversité du biote du sol grâce à l'augmentation des niveaux d'humidité, l'engorgement associé et l'augmentation de l'érosion des sols réduisent la biodiversité des sols. L'augmentation des niveaux de CO₂ atmosphérique peut améliorer la biomasse microbienne en augmentant la production végétale, mais pourrait réduire la complexité du réseau trophique, par exemple en diminuant l'abondance des espèces plus grandes, omnivores et prédatrices comme les nématodes. Le réchauffement affecte la biodiversité des sols, par exemple en favorisant les champignons plutôt que les bactéries, affectant ainsi la composition des consommateurs de niveau trophique supérieur.

Point d'alerte : *Au-delà de 35°C, aucun modèle ne s'accorde sur l'impact des températures sur la respiration hétérotrophe des communautés microbiennes des sols.*

1.2.1.2 Adaptation à l'échelle des écosystèmes

Ecosystèmes marins

Quoique moins documentée qu'en milieu terrestre, la redistribution spatiale des espèces marines sous changements climatiques récents est déjà largement amorcée pour la plupart des taxons avec un déplacement vers des eaux plus froides (Poloczanska *et al.* 2013) à des vitesses plus élevées qu'en milieu terrestre (Lenoir *et al.* 2020). Les modèles de niche anticipent une perte de biodiversité à l'équateur et un gain en zone tempérée ou arctique selon les scénarios optimiste RCP 4.5 (stabilisation des émissions) ou pessimiste RCP 8.5 (pas de modification de trajectoire) (Garcia Molinos *et al.* 2015 in Lavorel *et al.* 2017). Le déplacement des espèces forme de nouvelles

communautés constitués d'espèces qui n'avaient jamais coexisté auparavant et qui évoluaient sous d'autres conditions environnementales. Si ces déplacements ou changements phénologiques semblent démontrer la capacité d'adaptation de ces espèces, ils sont souvent source d'effets indirects plus complexes. Le changement d'aire de distribution ou de phénologie d'une espèce se traduit souvent par la perte d'un compétiteur ou d'une ressource pour d'autres espèces, modifiant ainsi le fonctionnement de l'écosystème et l'abondance des espèces. Un exemple classique concerne la modification des relations trophiques entre prédateurs et proies, ce qui conduit par exemple à une désynchronisation entre l'abondance de plancton et les poissons qui s'en nourrissent (Durant *et al.* 2007, Cushing, 1990 ; Ottersen *et al.* 2001).

L'intensification de l'ampleur et de la fréquence des événements extrêmes, notamment des épisodes brutaux de réchauffement, tels qu'El Niño, devrait induire de fortes modifications du fonctionnement des écosystèmes marins. En effet si l'acclimatation progressive des organismes laisse suggérer un pouvoir adaptatif important, leur tolérance aux événements extrêmes semble bien plus réduite (Palumbi *et al.* 2014). On observe ainsi une augmentation récente des événements de forte mortalité des poissons et invertébrés marins suite aux stress climatiques ou aux crises anoxiques (chute brutale de l'oxygène dissous) (Fey *et al.* 2015).

Exemple des coraux

La sensibilité des coraux aux modifications environnementales est bien documentée : aujourd'hui, environ 20 % des récifs ont définitivement disparu, 25 % sont en grand danger et 25 % supplémentaires seront menacés d'ici à 2050 si aucune action de gestion n'est menée (Wilkinson, 2008). Par contre, leur capacité à s'adapter génétiquement ou physiologiquement est à ce jour très peu connue. Leur difficulté d'adaptation génétique est liée à la vitesse actuelle de l'augmentation de la concentration en gaz carbonique atmosphérique et de la température globale, depuis le début de l'ère industrielle, respectivement 70 et 1 050 fois plus élevées que durant les 420 000 dernières années (Hoegh-Guldberg *et al.* 2007). Les coraux sont des organismes longévifs avec un temps de génération très long ce qui réduit théoriquement la possibilité de mutations bénéfiques. Cependant, van Oppen *et al.* (2011) ont montré qu'une colonie d'*Acropora* de 30 cm de diamètre peut être le siège de 100 millions de mutations somatiques par génération cellulaire : les colonies coralliennes que l'on pensait être clonales forment en fait une mosaïque de génomes (Schweinsberg *et al.* 2015) et pourraient permettre une adaptation génétique rapide des colonies coralliennes, qui reste cependant à démontrer. Ainsi, l'éventuelle adaptation des coraux est encore incertaine et la seule solution durable que préconisent les scientifiques est la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Gattuso *et al.* 2015).

Il existe de grandes différences inter- ou intra-spécifiques et certaines populations de coraux sont capables de résister naturellement à des températures élevées sans blanchissement, comme par exemple dans le golfe Persique où le blanchissement ne commence qu'à des températures supérieures à 34 - 35 °C, une température prévue selon les scénarios dans de nombreuses régions tropicales ou subtropicales avant la fin du siècle (Hume *et al.* 2015, Gattuso *et al.* 2015). De même, des populations de coraux de Papouasie-Nouvelle-Guinée vivant naturellement à des pH plus acides (7,8) que la moyenne des océans (8,1) maintiendra une couverture importante (Fabricius *et al.* 2011), avec néanmoins une dominance des coraux massifs par rapport aux coraux branchus. En milieu océanique, un pH de 7,7 semble constituer la valeur limite d'acidification permettant encore le processus de calcification (Fabricius *et al.* 2011). Si, en laboratoire, de nombreuses espèces de coraux continuent à calcifier à des pH beaucoup plus bas, elles présentent cependant de nombreuses altérations morpho-fonctionnelles (Tambutté *et al.*

2015). Ainsi, si certaines espèces semblent tolérantes, le récif lui-même est totalement déstabilisé et perd sa richesse spécifique et par conséquent sa faune associée. Il semble toutefois que la diversité corallienne et les taux de croissance puissent être maintenus dans certaines zones soumises à la fois à des hautes températures (≈ 30 °C) et à des bas pH (7,84) (Shamberger *et al.* 2014).

Ecosystèmes terrestres

Différents types de plantes, du fait de leur physiologie, montrent des sensibilités différentes aux modifications climatiques. Il semble en particulier que l'effet net de l'augmentation de la température sur le recyclage des nutriments par les plantes soit fortement régulé par la disponibilité en eau des sols, elle-même contrainte par les effets combinés de la réduction des précipitations et de l'augmentation des températures. Ce phénomène ralentit le métabolisme et le recyclage en réduisant l'absorption par les racines, réduit la photosynthèse par la fermeture des stomates des feuilles et la modifie les activités des microorganismes du sol. De ce fait les écosystèmes dominés par des espèces à photosynthèse en C4, caractéristiques des climats tropicaux, sont relativement moins sensibles que les écosystèmes dominés par des espèces à photosynthèse en C3 caractéristiques des climats tempérés.

Avec le déplacement des espèces, si ces nouveaux assemblages d'espèces sont dominés par des espèces ayant des traits fonctionnels différents de ceux des communautés initiales, le fonctionnement des écosystèmes sera modifié (Chapin *et al.* 2000). Par exemple, un climat plus humide, favorisant des espèces végétales dont les tissus sont plus riches en azote et moins riches en fibres induit une augmentation de la productivité primaire, de la décomposition des litières et de la minéralisation du carbone et de l'azote dans le sol (Lavorel, 2013).

1.2.2 Projections

Au sein des écorégions, le changement climatique modifiera la durée des saisons actives et les modèles saisonniers. On s'attend à ce que les espèces réagissent à ces changements en changeant leur phénologie : par exemple, feuillaison et floraison, saisonnière migration ou reproduction.

- ⇒ Le réchauffement, combiné à la désoxygénation ou à la restriction alimentaire, pourra entraîner des réductions de la taille corporelle moyenne et de l'abondance des poissons et d'autres ectothermes marins d'ici la fin du siècle.
- ⇒ Pour les amphibiens et les espèces strictement aquatiques, les modifications du régime des précipitations joueront un rôle crucial supplémentaire.
- ⇒ Les prédateurs marins (mammifères et oiseaux) de l'océan austral et antarctique vont connaître pour la grande majorité des impacts négatifs en conséquences des effets du réchauffement climatique sur les habitats de ces régions. Sont déjà observés des années avec de faibles reproductions, des diminutions de populations (50% pour certaines espèces), des problèmes de disponibilité des ressources (Bestley *et al.* 2020).
- ⇒ Sur terre et dans les écosystèmes d'eau douce, les ectothermes (animaux à sang froid) tropicaux seront affectés par des températures plus chaudes, car ils vivent déjà à des températures proches de leur optimum.
- ⇒ Pour les mammifères et les oiseaux d'eau de mer, eau douce, et terrestres, les impacts du changement climatique devraient être aggravés par la restriction de leur potentiel adaptatif.

1.3 Risque accru d'extinction locale, voire globale, pour les espèces à faible capacité de dispersion ou d'adaptation

Le changement climatique a des répercussions majeures sur l'extinction d'espèces, qui devrait s'intensifier (Pimm *et al.* 2014), d'autant que ces espèces subiront les effets du réchauffement bien après l'atteinte du pic (Meyer *et al.* 2022). Arneith *et al.* (2020), établissent qu'une fraction importante des espèces marines, aquatiques et terrestres pourrait être en danger d'extinction au 21^e siècle en raison des modifications du climat. Ces risques d'extinction sont basés sur la diminution prévue de l'aire de répartition ou de la taille des populations, avec de grandes variabilités selon les régions, les groupes taxonomiques, la prise en compte de l'inertie temporelle appelée "dette d'extinction", et la réduction de la vulnérabilité de certaines espèces en raison de leurs capacités d'adaptation dues à la diversité intraspécifique ou leur évolution rapide.

Les espèces dont les facultés de dispersion ne sont pas suffisantes risquent de disparaître localement et globalement (Schloss *et al.* 2012, Urban *et al.* 2015), mais la capacité de déplacement ne varie pas uniquement selon les espèces, elle dépend aussi de la présence de continuités écologiques qui jouent un rôle de corridors climatiques.

Point d'alerte : L'absence de continuité écologique est ainsi la première cause limitant l'adaptation des espèces au changement climatique.

Enfin, cette faculté de déplacement n'est pas non plus une garantie de survie, car même des espèces à forte capacité sont menacées par le changement climatique (Zanatta *et al.* 2020). Les amphibiens et les oiseaux migrateurs, par exemple, sont particulièrement touchés par les modifications du climat (Pounds *et al.* 2006 ; Miller-Rushing *et al.* 2008), mais il est généralement admis que la sensibilité des espèces à l'augmentation des températures est plus marquée en milieu marin (Blowes *et al.* 2019).

De même, les différences de potentiel adaptatif chez les différentes espèces feront que certaines souffriront du changement climatique et d'autres en profiteront, car mieux adaptées, et bénéficieront des niches écologiques libérées par les espèces qui disparaîtront de leurs aires de répartition (Jackson *et al.* 2022). Les espèces endémiques sont ainsi plus à risque (Manes *et al.* 2021), alors que le potentiel des espèces invasives pourra être renforcé par le changement climatique (Gervais *et al.* 2020, Adhikari *et al.* 2022),

Par exemple, les changements de la période de floraison des plantes et de la période d'activité des insectes pollinisateurs peut entraîner des déséquilibres entre les niveaux trophiques pouvant mener à des extinctions (Toby Kiers *et al.* 2010).

Le WWF a présenté les résultats d'un modèle traitant des conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité de 35 écorégions. Dans le scénario à +4,5°C la moitié des espèces qui peuplent actuellement les écorégions sont menacées d'extinction, cette perte serait divisée par deux dans le scénario +2°C (Warren *et al.* 2018). Et comme dit plus haut, passer de +2 à +1,5°C pourrait diminuer de 50% le nombre d'espèces menacées par le déplacement de leurs aires de répartition (Smith *et al.* 2018). 70 à 90 % des récifs coralliens pourraient être gravement dégradés ou disparaître d'ici 2050 même pour un réchauffement de 1,5 °C au niveau mondial (Guiot et Kramer, 2016).

Le risque d'extinction va s'accroître pour une grande partie des espèces durant le 21ème siècle et au-delà, en particulier lorsque le changement climatique interagit avec d'autres facteurs de pression (IPCC, 2014b) et ces extinctions d'espèces pourraient gravement compromettre le fonctionnement des écosystèmes (Bellard *et al.* 2012) et ainsi réduire les contributions de la nature aux Humains.

Point d'alerte : *la multiplicité des projections se basant sur différents scénarios rend difficile une prévision claire de l'ampleur des pressions à venir sur les écosystèmes, les espèces et leurs populations (Pereira et al. 2010).*

Encadré 1 :

Exemple de l'impact de l'augmentation du CO₂ (Arneth *et al.*, 2020)

Le CO₂ émis dans l'atmosphère a deux principaux effets : i) il augmente le réchauffement de l'atmosphère en piégeant davantage de chaleur ; ii) il acidifie les océans et l'eau douce en se dissolvant dans l'eau. Dans le premier cas cela entraîne aussi une plus grande évaporation d'eau dont la vapeur est également un gaz à effet de serre, et dans le deuxième cas, l'acidification des océans détruit des écosystèmes marins qui re-larguent leur carbone et augmente aussi la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère induit également une plus grande production primaire pour certaines espèces¹. Dans les régions semi-arides, l'augmentation des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère a ainsi contribué à la conversion des prairies en une végétation de plus en plus boisée (Zhu et al, 2016). Cet effet peut compenser, dans une certaine mesure, la réduction attendue de la production primaire nette et la baisse d'absorption de carbone résultant de climat plus chaud et plus sec. Une concentration atmosphérique enrichie en CO₂ favorise l'efficacité avec laquelle certaines plantes utilisent l'eau (les plantes qui utilisent la voie photosynthétique dite C3), ce qui augmente le ruissellement des bassins versants et impacte les écosystèmes d'eau douce à la fois directement, via la captation de l'eau, et indirectement à travers l'apport accru de carbone organique dissous.

L'acidification des océans a également des impacts contrastés sur les organismes. Lorsqu'ils sont calcifiants comme le phytoplancton, les gastéropodes, les crustacés, les coquillages ou les coraux, l'acidification a des effets délétères en raison des perturbations de la calcification. Parallèlement, certains producteurs primaires pourraient bénéficier de l'augmentation du CO₂ (Hasler *et al.* 2018).

Les actions directes du CO₂ peuvent donc consister en un effet d'entraînement sur les structures des réseaux trophiques et sur l'intégrité des habitats dans tous les écosystèmes (Heinze *et al.* 2015, Rogers *et al.* 2014). Dans de nombreuses régions, le changement climatique et l'augmentation du CO₂ atmosphérique aggraveront l'homogénéisation biotique causée par les activités humaines (pêche et agriculture) en favorisant des espèces généralistes (Clavel *et al.* 2011).

1

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page5.php#:~:text=The%20changes%20in%20the%20carbon,putting%20marine%20life%20in%20danger>

Encadré 2 :
Impacts de l'augmentation de la fréquence et de la gravité
des phénomènes météorologiques extrêmes (Arneth *et al.* 2020)

Les impacts de ces événements extrêmes sont beaucoup moins étudiés (Jentsch & Beierkuhnlein 2008, Harris *et al.* 2020). Ils ne sont ainsi pas suffisamment pris en compte dans les stratégies de conservation (Maxwell *et al.* 2018), alors qu'ils peuvent être des déterminants importants de la résilience des communautés, par exemple, grâce à la capacité des espèces à s'adapter aux habitats changeants (Pecl *et al.* 2017). Les périodes de sécheresse ou de canicule plus prononcées ou plus fréquentes pourraient avoir un impact disproportionné sur la diversité dans des régions déjà chaudes et/ou sèches (Li *et al.* 2013), car les espèces survivent déjà près de leurs limites physiologiques. Par ailleurs, les combinaisons de caractéristiques abiotiques et biotiques qui n'ont pas été observées dans le passé, pourraient conduire à l'émergence de nouvelles communautés, dans lesquelles les espèces coexisteront dans des associations inconnues aujourd'hui (Lurgi *et al.* 2012). Il semble également que les écosystèmes les plus riches en espèces sont plus susceptibles de connaître des extinctions en cascade lorsque l'intensité et la fréquence des événements climatiques extrêmes augmentent (Kaneryd *et al.* 2012).

2 Le futur de la biodiversité sous pression climatique en France ou en Europe pour les scénarios +2° en 2050 (accord de Paris) et +4° en 2100 (scénario pessimiste)

De nombreux impacts sont probables même pour les augmentations moyennes de la température mondiale inférieures à 2 °C. Des rapports font déjà état des impacts sur les systèmes de production et les infrastructures humaines avec des inondations côtières et des cours d'eau, une hausse des tempêtes, des mouvements de terrain et avalanches, une détérioration du bâti, sur les transports, sur la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie, l'industrie, le tourisme, les assurances et institutions bancaires.

Les secteurs dépendants directement de la biomasse seront directement affectés, comme les productions végétales, animales, la gestion de l'eau en agriculture, la foresterie, la bioénergie, la pêche et l'aquaculture, mais aussi pour le bien-être social et la santé humaine, sans parler des paysages et des héritages culturels (Kovats *et al.* 2014 in IPCC 2014a).

2.1 Niveaux de réchauffement de référence auxquels la France devra s'adapter et à intégrer dans l'ensemble des politiques publiques

Une augmentation de température de 1 °C correspond en France à un décalage des zones climatiques de près d'environ 200 km vers le nord (Lavorel *et al.*, 2017).

La température moyenne annuelle de la surface de l'eau devrait s'élever de 2,8 °C en mer Méditerranée d'ici 2100 selon le scénario médian (ni optimiste, ni pessimiste) A2 de l'IPPC, ce scénario étant un peu moins fort que le RCP8.5. Cette augmentation modifierait la distribution géographique de nombreuses espèces côtières en se basant sur un modèle de niche à 0,1° de résolution spatiale. Ainsi 54 des 256 espèces incluses dans ce modèle n'auraient plus de niche

climatique favorable et pourraient disparaître avec notamment un fort effet « cul-de-sac » en mer Adriatique qui agirait tout d'abord comme un refuge pour les espèces d'eau froide puis comme une trappe à extinction lors de son réchauffement.

Pour la biodiversité, on peut donc dire que +1° représente déjà un seuil auquel il faut repenser les politiques de conservation, et que la nécessité de l'adaptation est donc inéluctable puisqu'on sait que l'on dépassera ce degré de réchauffement.

Pour étudier le cas de la France métropolitaine, les scénarios pertinents sont RCP2.6 avec +1°C (constat actuel), +2,2°C de réchauffement climatique mondial en RCP4.5 (futur probable le moins négatif) et +4,5°C en RCP8.5 (futur possible le plus négatif), avec des gradients spatiaux dans l'axe nord-ouest/sud-est, un réchauffement plus sévère en été qu'au printemps, et plus marqué en montagne : Alpes et Pyrénées notamment (MétéoFrance 2020). Concernant les précipitations, ces scénarios prévoient tous une hausse des pluies en hiver et une baisse en été, avec également une hausse des pluies extrêmes dans la moitié nord. Le nombre de jours de vague de chaleur ou de canicules sera également en hausse, avec un doublement en RCP2.6 et fois 5 à 10 en RCP8.5, et le nombre de nuits tropicales augmentera également. Ces phénomènes seront exacerbés dans les régions actuelles les plus chaudes, notamment l'arc méditerranéen, le couloir rhodanien et la vallée de la Garonne. Au contraire les jours de vagues de froid vont diminuer et les gelées pourront devenir un événement rare, avec une diminution plus forte dans les régions actuellement les plus froides (est de la France et zones de montagne). L'évolution du climat pourrait augmenter l'étendue et la durée de la sécheresse dans les Alpes, et les écosystèmes aquatiques pourraient perdre des fonctions écosystémiques (Sauquet *et al.* 2021).

Selon Météo-France², les tendances des évolutions du climat en France métropolitaine au XXI^e siècle sont les suivantes :

- **Poursuite du réchauffement au cours du XXI^e siècle en France métropolitaine, quel que soit le scénario** : les projections climatiques montrent une poursuite du réchauffement jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, l'évolution de la température moyenne annuelle diffère significativement selon le scénario considéré. Le seul qui stabilise le réchauffement est le scénario de faibles émissions (RCP2.6). Selon le scénario de fortes émissions (RCP8.5), le réchauffement pourrait dépasser 4,6°C (période hivernale) et 5,1°C (période estivale) en fin de siècle par rapport à la période 1976-2005.
- **Peu d'évolution des précipitations annuelles au XXI^e siècle, mais des contrastes saisonniers et régionaux** : Le cumul annuel des précipitations varie largement d'une année à l'autre, variabilité qui persistera au cours du XXI^e siècle. Indépendamment de cette variabilité, les projections climatiques n'indiquent que peu d'évolution du cumul annuel en moyenne sur la France métropolitaine. Mais des tendances contrastées se dessinent à l'échelle des régions et plus encore à l'échelle des saisons. Ainsi, les projections climatiques indiquent une hausse des cumuls hivernaux sur la plupart des régions. Cette hausse est plus marquée sur le nord et l'est du pays, et particulièrement dans le scénario de fortes émissions (RCP8.5). Également, les projections climatiques indiquent une baisse des cumuls estivaux dans les scénarios de fortes émissions (RCP8.5)

² <https://meteofrance.com/climathd>

et d'émissions modérées (RCP4.5). Elles ne montrent que peu d'évolution dans le scénario de faibles émissions (RCP2.6).

- **Poursuite de la diminution du nombre de jours de gel et de l'augmentation du nombre de journées chaudes, quel que soit le scénario et des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes et intenses** : sur le territoire métropolitain, les projections climatiques montrent une augmentation du nombre de jours chauds en lien avec la poursuite du réchauffement. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, cette augmentation diffère selon le scénario considéré. À l'horizon 2071-2100, la hausse serait de l'ordre de 26 jours en plaine par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario d'émissions modérées (RCP4.5) et de 52 jours selon le scénario de fortes émissions (RCP8.5). Le seul qui stabilise l'augmentation est le scénario de faibles émissions (RCP2.6). La fréquence et la sévérité des vagues de chaleur augmenteront au cours du XXI^e siècle quel que soit le scénario considéré (RCP2.6 et RCP8.5). À l'horizon proche (2021-2050), l'évolution est assez semblable pour les deux scénarios. La fréquence des vagues de chaleur pourrait doubler par rapport à la période 1981-2010. Certains épisodes pourraient durer plus longtemps et s'accompagner de pics de chaleur plus élevés. À la fin du siècle, l'évolution diffère sensiblement selon le scénario considéré. En RCP2.6, la fréquence des vagues de chaleur et leurs caractéristiques ne devraient pas beaucoup évoluer par rapport à l'horizon proche (2021-2050). En RCP8.5, la fréquence des vagues de chaleur pourrait être multipliée par cinq par rapport à la période 1981-2010 avec une période d'occurrence s'étendant de fin mai à début octobre. Les épisodes se prolongeant plus d'un mois deviendraient fréquents et des vagues de chaleur ininterrompues durant plus de deux mois. Sur le territoire métropolitain, les projections climatiques montrent une diminution du nombre de jours de gel en lien avec la poursuite du réchauffement. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, cette diminution diffère selon le scénario considéré. À l'horizon 2071-2100, la baisse serait de l'ordre de 21 jours en plaine par rapport à la période 1976-2005 selon le scénario d'émissions modérées (RCP4.5) et de 33 jours selon le scénario de fortes émissions (RCP8.5). Le seul qui stabilise la baisse est le scénario de faibles émissions (RCP2.6). La fréquence et la sévérité des vagues de froid diminueront au cours du XXI^e siècle quel que soit le scénario considéré (RCP2.6 et RCP8.5). À l'horizon proche (2021-2050), l'évolution est assez semblable pour les deux scénarios. La fréquence des vagues de froid pourrait diminuer par rapport à la période 1981-2010. À la fin du siècle, l'évolution diffère sensiblement selon le scénario considéré. En RCP2.6, la fréquence des vagues de froid pourrait être divisée par deux par rapport au climat récent. La durée des épisodes ne devrait pas beaucoup évoluer, mais les événements les plus extrêmes pourraient s'accompagner de pics de froid un peu moins intenses que dans le climat récent. En RCP8.5, les vagues de froid pourraient devenir extrêmement rares.
- **Assèchement des sols de plus en plus marqué au cours du XXI^e siècle en toute saison** : la comparaison du cycle annuel d'humidité du sol sur la France entre la période de référence climatique 1961-1990 et les horizons temporels proches (2021-2050) ou lointains (2071-2100) sur le XXI^e siècle (selon un scénario SRES A2) montre un assèchement important en toute saison. En termes d'impact potentiel pour la végétation et les cultures non irriguées, cette évolution se traduit par un allongement moyen de la période de sol sec (SWI inférieur à 0,5) de l'ordre de 2 à 4 mois tandis que la période humide (SWI supérieur à 0,9) se réduit dans les mêmes proportions. On note que

l'humidité moyenne du sol en fin de siècle pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui.

2.2 Augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes

Des sécheresses de plus en plus fréquentes.

Avec une température moyenne de 13,9°C, l'année 2018 a été la plus chaude jamais connue en France métropolitaine depuis le début du 20^{ème} siècle, soit une hausse de 2,1°C par rapport à la période 1961-1990 (CGDD, 2019). Sur la période 1961-2010, le nombre de jours de gel annuel moyen a chuté de 12,5, soit -2,5 jours par décennie (CGDD, 2019). L'évolution des températures est sujette à une forte disparité spatiale. En France, la température moyenne est restée stable entre 1950 et 2010 dans un périmètre restreint des Pyrénées alors qu'elle a augmenté de 4°C autour du massif du Mont-Blanc (Massetti & Wroza, 2019). De même, l'élévation du niveau de la mer n'est pas également répartie. Selon les données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), entre 1900 et 2015, la hausse est de 19 cm à Brest pour l'océan Atlantique contre 10 cm à Marseille pour la mer Méditerranée (Massetti & Wroza, 2019). Dans le bassin méditerranéen, un changement du climat a été constaté à partir des années 70 avec plusieurs sécheresses régionales (Sangüesa-Barreda *et al.* 2019).

Dans le scénario le plus pessimiste, les températures moyennes pourraient augmenter de plus de 6°C en Europe du Nord en un siècle (carte 1). Quant aux températures estivales maximales, elles pourraient croître d'ici 2100 de 6,6°C en Bretagne et jusqu'à 12,9°C dans l'est de la France, où elles pourraient alors atteindre 55,3°C (Bador *et al.* 2017). Une augmentation des précipitations est prévue au nord du continent alors qu'elles devraient diminuer dans le sud, déjà concerné par un stress hydrique important. Le bassin méditerranéen est considéré comme l'une des régions les plus sensibles au changement global dans le monde (Doblas-Miranda *et al.* 2017). Les derniers modèles s'accordent sur une augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes et des sécheresses dans la région Méditerranée (Coppola *et al.*, 2020).

Des incendies de plus en plus fréquents.

De nombreuses études prévoient une augmentation de l'activité des incendies dans les écosystèmes méditerranéens au cours du siècle (Duane *et al.* 2019). Or, si le brûlage contrôlé peut favoriser la biodiversité, les feux de forêt non maîtrisés sont susceptibles d'avoir des conséquences négatives majeures pour les écosystèmes (Forest Europe, 2015). En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 51 % du territoire est boisé, soit plus de 16 000 km² et 97 % des communes sont sensibles au risque de feu de forêt (OFME, 2018).

Le niveau moyen mondial de la mer a augmenté de 13 à 20 cm depuis l'époque préindustrielle (Kopp *et al.* 2016). Ce processus s'est accéléré depuis les années 1990 (Watson *et al.* 2015) et la hausse après 1950 peut s'expliquer par le réchauffement climatique (Slangen *et al.* 2014). Cela a déjà contribué à la récession côtière (Vousdoukas *et al.* 2020 ; Mentaschi *et al.* 2018) et a rendu les côtes européennes plus sensibles aux risques côtiers. L'élévation continue du niveau de la mer le long des côtes européennes en raison du réchauffement climatique pourrait entraîner des inondations côtières sans précédent en Europe en l'absence de protection côtière supplémentaire et de mise en place de mesure de réduction des risques.

En France, les dommages causés par les inondations côtières représentent 200 millions € par an (Vousdoukas *et al.* 2020) (deuxième en Europe) et seront amenés à augmenter avec le niveau d'émissions de gaz à effet de serre (voir tableau 1)

En France	Base	Emissions modérées (RCP4,5)		Emissions fortes (RCP8,5)	
		2050	2100	2050	2100
Dommages annuels attendus (milliards €)	0,2	2,4	23,2	3,2	53,2
Nombre de personnes (en milliers) exposées aux inondations côtières	3,5	30,1	139,9	42,4	254

Tableau 1: Dommages annuels et nombre de personnes exposées aux inondations côtières selon différents scénarios d'émissions

Focus sur les outre-mer
<p>Les risques liés à la montée du niveau de la mer sont élevés à Saint-Martin, en Polynésie française, à Wallis-et-Futuna et à Saint-Pierre-et-Miquelon. Les risques liés à la sécheresse (ou à la désertification) sont faibles, mais certains territoires se distinguent par l'importance de la hausse de leurs températures : c'est le cas en particulier aux Antilles, avec une augmentation d'au moins un degré (et 2,2°C en Martinique) au cours des 60 dernières années. L'instabilité des précipitations est globalement le risque le plus élevé dans les territoires ultra-marins.</p> <p>Tous les territoires souffrent d'importants chocs pluviométriques. Ce risque est particulièrement présent dans la Guyane française, qui se reflète également dans certaines données, comme le nombre de victimes de catastrophes naturelles, ou l'instabilité des exportations et de la production agricole. Les Antilles, qui ont subi une forte hausse des températures, figurent aussi parmi les territoires connaissant l'augmentation la plus marquée des précipitations.</p> <p>Lewis (2022) a montré que, dans la région Caraïbes, les pertes et dommages économiques dus aux tempêtes tropicales ont progressivement augmenté entre 1980 et 2009, avec une augmentation drastique entre 2010 et 2019 avec les secteurs de l'agriculture, du logement, des transports et des services publics étant les plus touchés.</p>

2.3 Impacts différenciés en fonction des espèces

En Europe, la réduction de la diversité phylogénétique sera particulièrement importante au cours du 21^e siècle dans le sud, entraînant une perte conséquente d'histoire évolutive (Thuiller *et al.* 2011). Les différents groupes taxonomiques ne sont pas tous affectés de la même manière. La croissance des chênes pédonculé (*Quercus robur*) et rouvre (*Quercus petraea*) est accélérée par l'augmentation de la température moyenne et des précipitations tandis que le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) et le frêne commun (*Fraxinus excelsior*) ne sont significativement favorisés que par la hausse des précipitations (Maes *et al.* 2019). Les faibles précipitations au printemps et en été sont le principal facteur limitant pour la croissance des sapins blancs (*Abies alba*) sur un siècle de données (Martínez-Sancho & Merino, 2019).

Taccoen *et al.* (2019) ont étudié 43 espèces d'arbres européens et ont démontré que 19 d'entre elles sont déjà affectées par le changement climatique dont 18 subissent une mortalité

plus forte avec l'augmentation des températures ou la diminution des précipitations. En France, les modèles prévoient une réduction de l'aire du pin sylvestre alors que le Chêne vert serait lui, favorisé par le changement climatique (Cheaib *et al.* 2012). Le hêtre commun, sensible à des conditions plus sèches et chaudes (ONF, 2015) pourrait perdre 36 à 61 % de son territoire d'ici 2100 et des extinctions locales pourraient advenir même au cœur de son aire de répartition (Saltré *et al.* 2015).

Une augmentation de température de 1 °C correspond en France à un décalage vers le nord des zones climatiques de près de 200 km environ. Devictor *et al.* (2012) ont estimé que les températures s'étaient réchauffées en Europe de 1990 à 2008, de tel sorte qu'en 2008, il fallait s'être déplacé en moyenne de 249 km vers le nord pour trouver des températures équivalentes à celles mesurées 18 ans plus tôt. Or, sur cette période, les oiseaux s'étaient déplacés de 114 km et les papillons de 37 km en latitude. En Suisse, Roth *et al.* (2014) avaient démontré le même phénomène avec un déplacement en altitude entre 2003 et 2010, de 8 mètres en moyenne pour les plantes vasculaires, de 38 mètres pour les papillons et de 42 mètres pour les oiseaux de 42 mètres.

Casazza *et al.* (2014) ont étudié 22 espèces végétales de la région méditerranéenne non menacées en 2014, ils concluent que, selon le scénario RCP8.5, toutes devraient être menacées en 2050 dont 30 à 45 % en danger critique, perdant plus de 80 % de leur aire de distribution, selon le scénario RCP 4.5, 67 à 95 % seraient menacées d'ici 2050 dont 5 à 13 % en danger critique. Un nombre important de vertébrés du bassin méditerranéen, en particulier les endémiques, seront gravement menacés par le changement climatique (Maiorano *et al.* 2013). Selon le scénario RCP 6.0, les mammifères d'Europe pourraient perdre 13,7 à 21,5 % (en fonction de la dispersion) d'habitat propice entre 2000 et 2050 (Rondinini & Visconti, 2015).

En prenant en compte les variables climatiques et d'habitat, une réduction d'aire de répartition est prévue pour 71 % des oiseaux nicheurs européens d'ici 2050 avec 35 % des espèces qui perdraient plus de 25 % de leur distribution alors que 7 % verraient leur territoire s'agrandir de plus de 25 % (Barbet-Massin *et al.* 2012). Le déclin observé de certaines populations d'oiseaux migrateurs tels que le gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*) pourrait être attribué aux effets du changement climatique. En effet, les insectes sont abondants plus tôt dans la saison, ce qui affecte la disponibilité en nourriture pour les juvéniles et donc le succès reproducteur des insectivores (González-Braojos *et al.* 2017).

2.4 Impacts différenciés en fonction des biomes et des écosystèmes

Les biomes considérés comme les plus vulnérables sont les forêts méditerranéennes, les forêts tempérées de feuillus et mixtes, les forêts tropicales humides, les mangroves et les récifs coralliens, biomes qui sont tous représentés dans un ou plusieurs territoires français.

En Europe, le changement climatique devrait particulièrement affecter le pourtour méditerranéen, notamment dans les péninsules ibérique et italienne (Maiorano *et al.* 2013). Les caractéristiques géographiques et le relief peuvent localement avoir une influence notable sur les impacts du changement climatique sur les écosystèmes forestiers (Attorre *et al.* 2011). Il pourrait aussi impacter négativement la vie dans les sols, notamment les champignons mycorrhiziens et les processus écosystémiques associés tels que la nutrition des arbres, le stockage de l'eau, la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments (Castaño *et al.* 2018).

2.4.1 Impacts sur la végétation du bassin méditerranéen

Les écosystèmes méditerranéens souffriront de l'augmentation de la température, des changements de précipitations (en baisse dans la plupart des cas), de l'augmentation de la fréquence des sécheresses et des incendies (IPCC, 2014a ; Ipbes, 2018b). La baisse de fréquence des fortes précipitations va affecter la disponibilité des eaux souterraines, de façon deux fois plus importante dans le scénario émetteur (RCP 8.5) que dans le scénario modéré (RCP 4.5) (Moutahir *et al.* 2017). Les modifications de la distribution des espèces restent difficiles à prévoir mais pourraient occasionner une véritable recomposition des paysages forestiers (Efese, 2018). Une hausse moyenne de 2°C pourrait étendre le domaine méditerranéen jusqu'à la Loire (Efese, 2018).

Guiot et Kramer (2016) ont évalué les effets de 4 scénarios de réchauffement du bassin méditerranéen sur la végétation : RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6 (proche de la cible de 2°C) et un scénario à 1,5°C (noté RCP2.6L).

Leurs résultats montrent que :

- D'ici 2030, il n'y aura pas de changements significatifs des écosystèmes qui resteront dans les limites des fluctuations naturelles déjà observés au cours de l'Holocène.
- À la fin du 21e siècle, seuls les écosystèmes soumis à un réchauffement inférieur à 1,5°C (RCP2.6L) resteront dans les variations naturelles de l'Holocène, un réchauffement de 2°C (RCP2.6) fera évoluer les écosystèmes comme ils étaient pendant la période la plus extrême de l'Holocène (il y a 4700 ans B.P.), avec un changement de 12 à 15 % des écosystèmes correspondant notamment à une régression des zones boisées dans le sud de la Méditerranée associée à l'expansion du désert. Le scénario RCP4.5 induit l'extension du désert vers l'Afrique du Nord, la régression des forêts alpines et l'extension de la végétation sclérophylle méditerranéenne. Dans le scénario RCP8.5, tout le sud de l'Espagne se transforme en désert, les forêts de feuillus envahissent la plupart des montagnes et la végétation méditerranéenne remplace la plupart des forêts de feuillus dans une grande partie du bassin méditerranéen.

Comme on pouvait s'y attendre, les zones les plus sensibles sont celles situées à la limite entre deux biomes, par exemple dans les montagnes à la transition entre la forêt tempérée et la forêt montagnarde ou dans le sud de la Méditerranée à la transition entre les biomes forestier et désertique. L'analyse montre que, dans environ un siècle, sans politiques d'atténuation ambitieuses, le changement climatique anthropique modifiera probablement les écosystèmes de la Méditerranée avec des changements sans précédent au cours des 10 derniers millénaires.

Malgré les incertitudes connues dans les modèles climatiques, les scénarios d'émissions de GES découlant des engagements des pays avant l'Accord de Paris de la CCNUCC conduiront probablement à l'expansion substantielle des déserts dans une grande partie de l'Europe du Sud et de l'Afrique du Nord. Le scénario très ambitieux RCP2.6 semble être la seule voie possible vers des impacts plus limités. Cette analyse ne tient pas compte des autres impacts humains sur les écosystèmes qui devraient s'intensifier en raison de l'expansion de la population humaine et de l'activité économique. Il est donc probable que les effets seront en réalité beaucoup plus forts et que les déplacements des biomes seront plus rapides.

2.4.2 Impacts sur les écosystèmes tempérés

Parmi les habitats tempérés les plus altérés, les ripisylves (forêts bordant les cours d'eau) ont subi des pertes importantes dans la majeure partie du réseau fluvial européen, affectées notamment par les modifications des réseaux hydrologiques (Janssen *et al.* 2016). Un climat plus chaud et plus sec, en provoquant la perte d'espèces clés, affectera les relations entre diversité et productivité des forêts tempérées et donc leur résilience face au changement climatique (Morin *et al.* 2018). Dans les sites les plus froids, l'augmentation de la température moyenne améliore la productivité forestière mais cette dernière diminue aux latitudes inférieures en raison de la baisse des précipitations (Morin *et al.* 2018).

Les modèles projettent d'importantes réductions des aires de répartition pour les arbres des forêts tempérées de basse altitude en raison du changement climatique (Cheaib *et al.* 2012), notamment à cause de l'aridification (Ipbes, 2018b).

2.4.3 Impacts sur les forêts

Dans le monde entier, des forêts font face à un déclin alarmant de causes multifactorielles incluant le changement climatique et l'invasion de parasites ou d'agents pathogènes exotiques (Homet *et al.* 2019). Plusieurs études ont établi un lien entre les épisodes climatiques extrêmes (sécheresse, vagues de chaleur) et l'augmentation des taux de défoliation et de mortalité des arbres (Sanguesa-Barreda *et al.* 2015).

Ainsi, le changement climatique est le principal facteur de changement des forêts européennes et ses effets pourraient être considérables dans les décennies à venir (Efese, 2018). Selon Hickler *et al.* (2012), d'ici 2085, 31 à 42 % de la surface de l'Europe devrait être couverte par un type de végétation différent.

En zone méditerranéenne, la disponibilité en eau est le principal facteur limitant pour la croissance des peuplements forestiers et la sécheresse cause le dépérissement des forêts en augmentant significativement les taux de mortalité. L'intervention humaine et les conditions climatiques favorisent le remplacement des forêts de feuillus par des forêts de conifères, plus sensibles aux feux de forêt réguliers (Ipbes, 2018b).

Les forêts méditerranéennes représentent 1,8 % de la surface forestière mondiale et sont sous l'influence d'un climat caractérisé par des hivers frais et humides et des étés chauds et secs, causant un stress hydrique (Gauquelin *et al.* 2016). La disponibilité en eau est donc le principal facteur limitant pour la croissance des peuplements forestiers et la sécheresse est identifiée comme responsable majeur du dépérissement des forêts (Sánchez-Salguero *et al.* 2012). Or, l'élévation des températures provoque une évapotranspiration plus forte et donc une réduction des réserves en eau du sol (Condés & García-Robredo, 2012). Dans le cadre d'une expérimentation, la sécheresse a augmenté significativement la mortalité, avec un taux de survie 20,6 % plus faible pour les Pins noirs (*Pinus nigra*) qui y étaient exposés (Thiel *et al.* 2012). La croissance des arbres est également impactée par l'évolution du climat. Si pour plusieurs arbres méditerranéens, il y a moins de recrues (nouveaux plants qui s'établissent) aux altitudes basses des aires de répartition, la croissance y est plus rapide, ce qui pourrait contrebalancer pour certaines populations l'effet négatif du réchauffement sur la survie des espèces à la limite inférieure de leur aire de répartition (Benavides *et al.* 2015).

2.4.4 Impacts sur les écosystèmes dulçaquicoles de surface

Les zones humides sont de différents types : alluviales, sources, marais, tourbières, lacs, zones saumâtres...

Les effets du changement climatique comprennent :

- Diminution des précipitations ;
- Augmentation de l'évapotranspiration ;
- Augmentation des températures sur les communautés végétales et animales ;
- Augmentation du niveau de l'océan ;
- Réduction des débits et des niveaux d'eau ;
- Augmentation de la température de l'eau ;
- Diminution de la neige et du niveau des nappes souterraines.

Conséquences sur les écosystèmes et la biodiversité :

- Diminution des niveaux d'eau : assèchement, incapacité des espèces végétales en place à tolérer une diminution de l'hydromorphie sur des périodes prolongées : mortalités, diminution de populations ;
- Augmentation du niveau marin : salinisation, submersion prolongée : mortalités, diminution de populations ;
- Eutrophisation, baisse d'oxygène, colmatage (sédiments) : mortalités, diminution de populations ;
- Rupture de continuité (assèchement temporaires longs, bras morts, etc.) : disparition d'habitats ;
- Modification des habitats, réduction de populations : favorisation d'espèces exotiques envahissantes.

Les écosystèmes dulçaquicoles de France métropolitaine subissent depuis plusieurs décennies un réchauffement estival des eaux des rivières d'amplitude variable suivant l'altitude du bassin versant de la rivière et son type d'alimentation. Daufresne *et al.* (2004) notent une augmentation de 1,5 °C sur le Haut-Rhône au niveau du Bugey entre 1979 et 1999. En Suisse l'écart de température entre les périodes 1978-1987 et 1988-2002 varie de 1,2 °C à zéro depuis les rivières du plateau suisse aux torrents alimentés par les glaciers (Hari *et al.* 2006). Des changements hydrologiques sont également perceptibles, avec notamment une baisse significative des étiages dont l'occurrence est plus précoce, des débits hivernaux et de début de printemps augmentés. Les communautés biologiques répondent à ces changements comme celles d'autres écosystèmes : modifications des aires de répartition, de la phénologie, de la richesse spécifique (Heino *et al.* 2009).

Les espèces se propageant par une phase aérienne comme la plupart des insectes adultes, ou par des semences, voient leurs aires de répartition changer rapidement : les espèces de libellules des eaux dormantes du sud de l'Europe étendent leur aire de distribution de 115 km par décennie vers le nord (Grewe *et al.* 2013).

Les espèces d'eau froide se réfugient dans le haut des cours d'eau laissant place aux espèces d'eau chaude qui colonisent progressivement vers l'amont des fleuves. Ces déplacements vers l'amont seront facilités par le rétablissement de la connectivité des cours d'eau. Dans le bassin du Rhône à hauteur du Bugey, des poissons thermophiles remplacent progressivement en amont les espèces d'eau plus froide ; le même type de remplacement est observé chez les invertébrés (Daufresne *et al.* 2004). Ces changements ne sont pas tous graduels, certains dépendent d'événements hydroclimatiques extrêmes comme les crues ou les canicules. Dans les lacs, le réchauffement des eaux et leur plus forte stabilité favorisent les

espèces phytoplanctoniques capables de déplacements verticaux actifs comme des cyanobactéries dont le risque de prolifération est augmenté avec le réchauffement (Paerl & Paul, 2012). Le réchauffement des eaux favorise également certains parasites dont l'impact sera accru (Karvonen *et al.* 2010). Le parasite myxozoaire *Tetracapsuloides bryosalmonae* provoque la maladie prolifératrice des reins (PKD) qui cause des mortalités chez les salmonidés. En Suisse, Wahli *et al.* (2008) ont montré qu'il y a une bonne corrélation entre la prévalence de ce parasite et l'altitude ou la température de l'eau. Actuellement le parasite n'est pas présent au-dessus de 800 m, mais il se propagera vers l'amont si les températures augmentent, mettant en péril des populations de truite (Bettge *et al.* 2009).

2.4.5 Impacts sur les écosystèmes marins

Le changement climatique provoque un réchauffement des océans, leur acidification et leur désoxygénation induisant des pertes de biodiversité et des impacts sur la santé planétaire (Talukder *et al.* 2022). Le RCP2.6 prédit une hausse de 0,8°C des océans d'ici 2050 et 1,2°C d'ici 2100, tandis que le RCP8.5 renvoie à des valeurs de 1,5 °C d'ici 2050 et 3,2 °C à 2100 (Genner *et al.* 2017). En France métropolitaine, les forêts de laminaires pourraient se déplacer vers le nord avec des extinctions locales d'ici 2041-2050 dans les scénarios 2.6 et 8.5, et avec des pertes de biomasse dues à la raréfaction des surfaces rocheuses sur lesquelles se fixer en allant plus vers le nord, avec la Bretagne comme dernier refuge (Pecquet *et al.* 2022).

Enfin, l'absorption future de carbone de l'atmosphère dans les systèmes marins dépendra de la productivité primaire nette du phytoplancton en plus des processus physiques (dissolution et mélange), avec une baisse projetée de la productivité primaire nette à la fin du siècle (Bopp *et al.* 2013).

Encadré 3 :

Les résultats de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques

L'évaluation Efese identifie les risques pesant sur les écosystèmes français (pollution, dégradation des habitats, surexploitation, introduction d'agents pathogènes et invasifs), risques d'autant plus marqués dans le contexte actuel de changement climatique. Les écosystèmes français, aquatiques et terrestres, sont ainsi considérablement exposés au changement climatique. En métropole, le changement climatique « affecte déjà et affectera durablement les forêts françaises », il « pourra fortement affecter les écosystèmes agricoles français », au-delà des effets déjà perceptibles, il constitue une menace pour les écosystèmes de haute montagne, il accroît les situations de stress hydrique auxquelles sont exposés les milieux aquatiques terrestres et « il induit déjà des modifications des milieux qui affectent la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins ». Par ailleurs, les écosystèmes ultramarins apparaissent particulièrement vulnérables au changement climatique. Parmi les phénomènes en cours, on relèvera notamment la perturbation récente et de grande ampleur de la forêt amazonienne, l'exposition accrue aux incendies des écosystèmes altimontains réunionnais ou la très forte vulnérabilité des écosystèmes coralliens aux impacts du changement climatique (Efese, 2020).

3 Impacts du changement climatique sur les services écosystémiques

Malgré les limites inhérentes à une évaluation purement économique, il est établi que la biodiversité et les services qui en découlent ont une valeur inestimable. Au niveau mondial, la valeur économique totale des écosystèmes marins, aquatiques et terrestres est estimée à près de 125 000 milliards de dollars US [valeurs de 2007]) (Costanza *et al.* 2014). Les risques potentiels découlant du changement climatique concernent donc à la fois la richesse économique et le bien-être humain. Les écosystèmes français sont le support de nombreuses activités économiques (agriculture, élevage, filière bois, pêche, conchyliculture, écotourisme, équipements de pêche et chasse, etc.) dont certaines présentent un caractère traditionnel marqué et contribuent à la dimension patrimoniale des écosystèmes français (terroirs, etc.). Efese a recensé un chiffre d'affaires de plus de 80 milliards d'euros et des centaines de milliers d'emplois répartis sur l'ensemble des territoires. En termes de valorisation financière des services écosystémiques, Svartzman *et al.* (2021) estiment que 42 % de la valeur des titres détenus par les établissements financiers français proviennent de secteurs fortement ou très fortement dépendants d'un ou plusieurs services écosystémiques. Ils constatent également que l'empreinte biodiversité terrestre cumulée de ces titres est assimilable à la perte d'au moins 130 000 km² de nature « vierge », ce qui correspond à l'artificialisation complète de 24 % de la superficie de la France métropolitaine.

À côté de ces valeurs marchandes, de nombreux autres services non-marchands contribuent à l'ensemble des dimensions du bien-être de la population française. Dans certains cas, l'évaluation monétaire de certains services non-marchands (récréation, etc.) suggère que leur valeur dépasse largement celle des biens et services marchands. Par exemple, pour la forêt, le bois récolté représente une valeur marchande de près de 2 milliards d'euros, tandis que le bois non-commercialisé représente une récolte significative dont la valeur est estimée à près d'un milliard d'euros, et que la méthode des coûts de déplacement permet d'estimer le consentement à payer total des Français pour se rendre en forêt, à près de 10 milliards d'euros par an (Efese, 2020).

L'altération de la diversité, génétique et spécifique, a des implications potentiellement fortes pour les services écosystémiques (Bellard *et al.* 2012). Dans une revue de la littérature, les effets du changement climatique sur les services écosystémiques apparaissent majoritairement négatifs, mais avec des variations entre services, facteurs et méthodes d'évaluation (Runting *et al.* 2016).

Bien que les études de simulation à l'échelle mondiale soient rares, la littérature pointe sans équivoque vers des impacts climatiques disproportionnés sur les sociétés pauvres, tant en termes d'avantages matériel que non matériel (Boone *et al.* 2018).

Les conséquences pour les humains sont la perte de services écosystémiques comme la perte de capacité des écosystèmes à stocker du carbone (mangroves, forêts, prairies), la perte de capacité de protection du trait de côte face à la montée des eaux (mangroves), des baisses de productivité agricoles (jusqu'à 10% actuellement, 50% en 2050) et forestières, la baisse des rendements de pêche.

Points d'alerte : *La relation biodiversité-services n'est pas linéaire et la perte de services peut être amplifiée par rapport à cette perte de biodiversité : par exemple une étude sur les forêts de laminaires en France montre que la perte de services fournis par ces algues est supérieure à la*

perte de biomasse qu'elles subiraient sous l'effet du changement climatique (Pecquet et al. 2022).

Les impacts sur la production de biomasse illustrent les liens entre services écosystémiques d'approvisionnement, services écosystémiques de régulation, biodiversité et changement climatique.

Un autre exemple est la conséquence des modifications dans les écosystèmes d'eau douce sur certains services écosystémiques comme :

- Services de régulation : diminution de l'intensité des crues et inondations (zones tampons), réserves d'eau, recharge de la nappe phréatique, épuration des eaux, végétaux ;
- Services support : formation de sol, stockage du carbone et autres cycles ;
- Services d'approvisionnement : activités économiques ;
- Services socioculturels : diverses activités récréatives.

Encadré 4 : Services écosystémiques sous pression climatique

Plusieurs travaux et projections permettent d'anticiper des risques probables liés à l'effet du changement climatique sur les services écosystémiques, résumé ci-après :

→ **Déstockage de carbone entraînant une aggravation du changement climatique** : tourbières du nord, pergélisol, écosystèmes tropicaux en réponse au réchauffement et à la sécheresse (Huntingford *et al.* 2013).

→ **Diminution de la production primaire des océans entraînant une baisse des ressources halieutiques** : en 2050 les potentiels globaux de capture augmenteront de 30 à 70 % dans les régions de haute latitude et une baisse susceptible d'atteindre 40 % est attendue dans les régions tropicales (Cheung *et al.* 2009) compromettant la sécurité alimentaire dans de nombreux pays du sud (Lam *et al.* 2012).

→ **Diminution des services d'approvisionnement entraînant une perte de rendements** : forestiers (Dale *et al.* 2010), piscicoles (Stram & Evans, 2009), agricoles (Howden *et al.* 2007).

→ **Dégradation des sols, entraînant une perte des services écosystémiques liés aux champignons mycorhiziens** (Castaño *et al.* 2018) avec diminution de la nutrition des arbres, le stockage de l'eau, la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments.

→ **Diminution du service de régulation des pathogènes entraînant une augmentation des émergences infectieuses** : contrôle des parasites et espèces envahissantes (Ziska *et al.* 2011), gestion des maladies (Harvell, 2002).

Type d'écosystème	Surface (Mha)	Part du territoire métropolitain	Changement d'usage des terres et des mers	Exploitation directe des organismes	Changement climatique	Pollution	Espèces invasives
Zones agricoles	26,8	49 %					
Forêts	16,9	31 %					
Zones urbaines	2,7	5 %					
Autres zones artificialisées	2,3	4 %					
Haute montagne	1,7	2 %					
Eaux intérieures	1,7	3 %					
Autres zones humides	1,8	3 %					
Autres surfaces	1,3	3 %					
Total : surface géodésique	55,2	100 %					
Écosystèmes marins et côtiers ^a	29,7						

	Risque de grande ampleur reconnu et non maîtrisé		Risque de grande ampleur reconnu, ou risques locaux avérés. Incertitude sur la maîtrise de ces risques.		Risques de grande ampleur maîtrisés. Des risques locaux restent possibles.
--	--	--	---	--	--

a. Zone économique exclusive rattachée à la métropole.

Source : DG Trésor à partir des données de l'« Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques » (Efese), plateforme initiée en 2012 impliquant des parties prenantes larges (experts, usagers, politiques) afin d'appuyer la prise de décision des acteurs privés et publics. Le niveau de risque associé à chaque pression est estimé par l'Efese et s'appuie, entre autres, par le dépassement de seuils réglementaires existants associés à chaque type de pression. Voir EFESE (2020) Du constat à l'action : rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques. (p.33). Les autres données (surfaces) sont issues des sites Eaufrance.fr, limitesmaritimes.gouv.fr, agreste.agriculture.gouv.fr.

Tableau 2 : Les types d'écosystèmes en France et leur exposition aux facteurs de pertes de biodiversité (Bouchet *et al.* 2021)

D'une manière générale, en France, les services écosystémiques sont tous exposés aux pressions à l'origine des pertes de biodiversité, avec ces risques de grande ampleur plus ou moins maîtrisés et avec de potentiels risques locaux. Les facteurs de perte de biodiversité les plus importants pour les services apportés par les écosystèmes français sont le changement d'usage des terres et des mers, le changement climatique ainsi que les pollutions (Bouchet *et al.* 2021).

3.1 Variabilité des rendements (service de production)

C'est le cas de l'approvisionnement en ressources forestières (Dale *et al.* 2010), piscicoles (Stram and Evans, 2009), agricoles (Howden *et al.* 2007).

Concernant les ressources halieutiques, en 2050, les potentiels globaux de capture augmenteront de 30 à 70 % dans les régions de haute latitude et une baisse susceptible d'atteindre 40 % est attendue dans les régions tropicales (Cheung *et al.* 2009) compromettant la sécurité alimentaire dans de nombreux pays du sud (Lam *et al.* 2012). Les réductions de la taille corporelle moyenne et de l'abondance des poissons et d'autres ectothermes marins d'ici la fin du siècle aura des conséquences directes sur la pêche.

En agriculture, sur la base de projections sur 20 ans avec augmentation des températures de 1,5 et 2°C (Hristov *et al.* 2020) :

- **Sur le maïs grain** : la culture la plus affectée par le changement climatique en Europe, avec, à +2°C, une perte de rendement de 1 à 14 % en Europe du nord et de 4 à 22 % en

Europe du sud, avec larges bénéfices du 1,5°C versus le 2°C, en considérant que l'irrigation persiste. Si l'irrigation est compromise, ces pertes montent à 23 % en moyenne avec des valeurs de 80 % dans certains pays (Portugal, Bulgarie, Grèce et Espagne). Les stratégies d'adaptation testées (modification des dates de semis et des variétés pour éviter les stress thermiques et les conditions de sécheresse) ne seront pas suffisantes pour pallier les effets négatifs du changement climatique.

- **Sur le blé** : les projections sont très variables car les projections de modifications des précipitations sont également très variables et cette culture n'est pas irriguée. Les projections montrent toutefois une hausse des rendements en Europe du nord vers 2050 allant de + 5 à +16% (de par l'augmentation des précipitations combinée à un cycle de croissance plus court et une augmentation du CO₂ atmosphérique, et des réductions en Europe du sud en 2050 allant jusqu'à 49 % (l'augmentation du CO₂ étant sans effet car c'est l'eau le facteur limitant), sans grande différence entre 1,5 et 2°C (juste un mieux à 1,5°C dans la péninsule ibérique et l'Italie). L'irrigation de ces cultures pourrait permettre d'augmenter les rendements dans toute l'Europe et limiter leur variabilité, mais avec des questions autour du coût économique et environnemental de l'irrigation. La sélection variétale pourrait être plus bénéfique que chez le maïs avec des variétés à croissance plus rapide là où il y a des précipitations.

A noter que ces projections sous-estiment les événements extrêmes (stress thermique et sécheresse).

Dans les régions sèches et chaudes, il a été démontré que la réduction de la productivité herbacée se traduisait par une réduction de la production animale, avec des impacts économiques (Boone *et al.* 2018), mais également par une réduction des rendements des cultures (Rosenzweig *et al.* 2014). Une série de données portant sur 664 ans jusqu'en 2018 a permis de montrer que les dates de vendanges dans la région de Beaune sont restées stables, aux alentours du 28 septembre, jusqu'en 1987 et que, depuis, cette date de vendanges y était plus précoce de 13 jours (Labbé *et al.* 2019). Avec la hausse des températures critiques et la baisse des précipitations, la vigne subit une altération du taux de développement, l'altération de la qualité de la production et la variabilité des rendements, ainsi qu'un déplacement des cultures vers le nord (Droulia & Charalampopoulos 2022).

Les agrosystèmes dépendant des précipitations risquent d'être compromis, avec notamment une perte de 30 % des récoltes en Afrique d'ici 2050 (Muluneh, 2021), ce qui, par répercussion, pourrait influencer d'autres parties du monde où l'agriculture pourrait être intensifiée pour pallier ce manque et ainsi poursuivre la perte de biodiversité et l'aggravation du changement climatique induit par l'agriculture intensive.

3.2 Perte du service de pollinisation

Les taux de migration sont susceptibles de différer selon les pollinisateurs et les espèces végétales, ce qui soulève la perspective d'une dislocation spatiale des plantes et de leurs pollinisateurs ; des preuves récentes des impacts du changement climatique sur les bourdons suggèrent qu'il existe des limites adaptatives à la capacité de ce groupe de pollinisateurs à suivre le changement climatique (Ipbes, 2016). Environ 5 à 8 % de la production alimentaire (en volume) serait perdue chaque année sans les pollinisateurs (Potts *et al.* 2016). Le changement climatique

peut donc affecter l'approvisionnement alimentaire non seulement par l'adéquation des cultures et son impact direct sur les rendements, mais aussi, à travers les types de réseaux plantes-pollinisateurs. Cette perte a plus d'effets sur la santé humaine et l'économie, car les cultures dépendantes de la pollinisation ont tendance à être plus nutritives (fruits, noix) et plus rentables (café) (Potts *et al.* 2016).

3.3 Accélération des émergences infectieuses ou parasitaires

Le changement climatique facilite la propagation des maladies à transmission vectorielle telles que le paludisme, qui atteignent de nouvelles zones. Diminution, et participe à la diminution du contrôle des parasites et espèces envahissantes (Ziska *et al.* 2011) ou encore de la gestion des maladies (Harvell, 2002).

L'expansion du bostryche typographe (*Ips typographus*), coléoptère ravageur des forêts épicéas, étant favorisée par le changement climatique qui accroît le nombre de générations, le risque d'infestations massives augmente (Jakoby *et al.* 2019). D'autres parasites comme la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) profitent aussi des hivers moins rigoureux pour se propager vers le nord, à un rythme moyen de 4 km par an (Efese, 2018).

3.4 Déstockage du carbone

Wang *et al.* (2020) ont montré que les déclin de la séquestration du carbone seront exacerbés par différents scénarios de perte de diversité végétale à l'avenir. Cette méta-analyse a révélé que la perte de diversité végétale a des impacts négatifs omniprésents sur de multiples attributs de carbone dans les prairies, a souligné les effets interactifs de la perte de diversité végétale et de la durée expérimentale sur les attributs de carbone, et a suggéré que la réduction du stockage de carbone dans les prairies suite à la perte de biodiversité sera plus grand à l'avenir.

De même, en milieu océanique, le plancton représente un vecteur de puits de carbone important puisque leurs cadavres et déjections produisent une pluie de carbone s'accumulant dans le fond des océans (Cavan & Hill 2022), malheureusement 21 % de ce puits et 39 % des efforts de pêche se recouvrent dans des zones communes, notamment en Atlantique nord-ouest, avec de forts risques donc de voir ce puits de carbone se réduire.

La perte de biodiversité aggrave ainsi la crise climatique : la diminution de l'abondance des espèces, les extinctions locales, ainsi que la dégradation rapide et/ou perte d'écosystèmes tels que les mangroves (Thomas *et al.* 2017), les forêts tropicales (Bonan 2008), les tourbières (Loisel *et al.* 2021) et les herbiers marins (Waycott *et al.* 2009) ont un impact majeur sur la capacité de notre planète à stocker le carbone.

4 Lacunes de connaissances

4.1 Améliorer les connaissances sur les potentiels plastiques des différentes espèces

De nombreuses lacunes de connaissances persistent sur la manière dont le vivant est affecté par le changement climatique et sur les capacités d'adaptation ou de déplacement des espèces. Il est notamment essentiel de comprendre quelles caractéristiques fonctionnelles améliorent ou limitent les potentiels d'adaptation (Visser 2008 in Lavorel *et al.* 2017). Il reste notamment à déterminer si la réduction de la taille du corps constituera une réponse uniforme des différents groupes, terrestres, d'eau douce et marins, tant pour les ecto- que les endothermes (animaux à sang chaud), puisque ces derniers peuvent mieux s'adapter aux températures variables.

Les recherches sur la plasticité phénotypique individuelle nécessitent des grands jeux de données et des programmes à long terme, qui n'existent à ce jour que pour un petit nombre d'organismes. Par ailleurs, les études actuelles sont souvent basées sur des extrapolations à partir d'un petit nombre de modèles biologiques. Il conviendrait d'élargir le nombre de taxons étudiés, notamment pour pallier l'absence de séries temporelles sur les animaux marins et sur les plantes, limitant les conclusions sur ces groupes (Reusch, 2014).

4.2 Améliorer la connaissance sur les potentialisations croisées des différentes pressions et les impacts sur les services écosystémiques

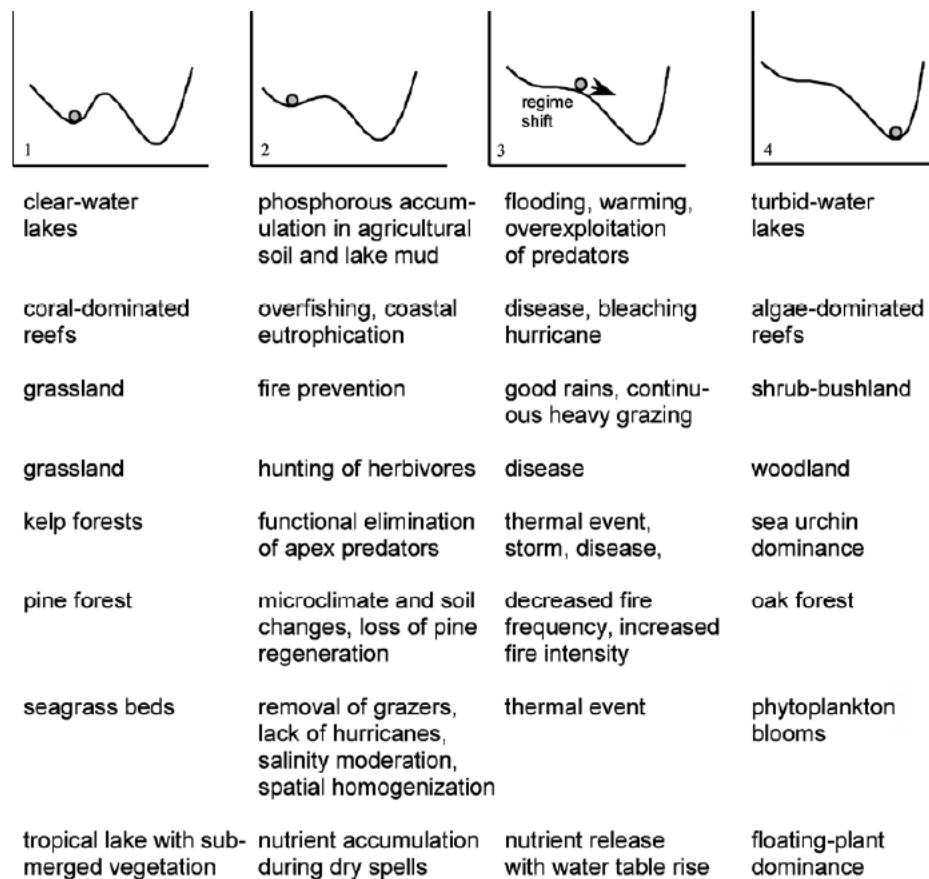
Il y a également des manques dans la compréhension des interactions entre les différentes pressions (Doblas-Miranda *et al.* 2015). Des rétroactions, effets en cascade ou d'emballement sont probables, en particulier le changement climatique augmente les invasions biologiques qui elles-mêmes entraînent des pertes de biodiversité aggravant le changement climatique, et ainsi de suite.

La façon dont la biodiversité, en particulier la composition des espèces et le fonctionnement des écosystèmes, aura un impact sur les services écosystémiques dans différentes régions reste largement non quantifiée en raison de l'absence de modèles basés sur les processus capables de prendre en compte ces interactions complexes (Ipbes, 2019).

Un exemple est l'absence de compréhension globale de la façon dont l'évolution des dommages causés aux forêts par les ravageurs et pathogènes exotiques va s'articuler avec d'autres conséquences du changement climatique (Homet *et al.* 2019).

4.3 Prendre en compte les risques de dépassement de seuils et de « point de bascule » des écosystèmes dans les modèles climatiques

Des écosystèmes entiers peuvent changer d'état sous des pressions cumulées. Ainsi l'eau des lacs peut passer de claire à turbide, les écosystèmes côtiers peuvent perdre leurs coraux et se peupler d'algues, d'autres peuvent se dépeupler de leurs algues, les prairies peuvent se transformer en maquis ou en forêts, les forêts de pins peuvent se transformer en forêts de chênes etc. (confère figure suivante).



Source: Folke et al. (2004). Permission to reproduce from *Annual Reviews, Inc.*

Figure 1 : états alternatifs dans une diversité d'écosystèmes (1, 4) et les causes (2) et déclencheurs (3) derrière la perte de résilience et les changements de régimes (vu dans Folke *et al.* 2004).

Ainsi, de multiples points de bascule pour les écosystèmes côtiers ont été identifiés de par la hausse du niveau des océans qui entraînerait la perte de portions critiques d'habitats de ces écosystèmes, modifiant ainsi leur biodiversité globale et les fonctions de ces écosystèmes (Barnard *et al.* 2021). Afin d'éviter d'atteindre les seuils auxquels des faibles variations environnementales peuvent entraîner de forts changements dans les propriétés des écosystèmes, il reste à identifier et bien surveiller les variables *ad hoc* (Laurance *et al.* 2011) ainsi que les signaux d'alerte qui peuvent permettre d'anticiper ces points de bascule (de Oliveira Roque *et al.* 2018).

4.4 Prendre en compte les rétroactions avec d'autres enjeux pour prioriser les actions

Au niveau mondial, les changements d'équilibres entre le stockage et le déstockage de carbone marins et terrestres génèrent des rétroactions, qui amplifient les émissions de CO₂ et le forçage climatique dans de nombreux scénarios. Ces rétroactions sont directement causées par des changements dans la physiologie des espèces (notamment altération des métabolismes des phyto et zooplanctons) et des changements dans la diversité qui agissent sur la pompe biologique du carbone et qui ne sont pour l'instant que peu pris en compte (Ciais *et al.* 2013, Boyd, 2019). Sur terre, la transformation des toundras en forêts de conifères ou en végétation

tropicale tolérante à la sécheresse pourrait, au contraire, atténuer les impacts négatifs attendus du changement climatique sur la productivité et l'absorption de carbone (Ciais *et al.* 2013).

Bien que les animaux aient longtemps été considérés comme jouant un rôle négligeable dans le cycle du carbone, il est établi que les herbivores réduisent fortement la biomasse autotrophe, améliorent le transfert de lumière dans les couverts végétaux ou dans les eaux profondes et augmentent l'apport de nutriments dans les sols et les sédiments (Schmitz *et al.* 2018, Boyd *et al.* 2019). Les effets en cascade induits par les prédateurs ou les grands herbivores se propagent à travers les réseaux trophiques et se répercutent sur le fonctionnement d'écosystèmes entiers. Ainsi, des études sur le milieu terrestre ont établi que les conséquences écosystémiques de la présence ou de l'absence d'herbivores et de carnivores étaient quantitativement aussi importants que les effets d'autres facteurs environnementaux abiotiques tels que le réchauffement, l'augmentation du CO₂ atmosphérique ou la variation du dépôt de nitrate (Hooper *et al.* 2012). On parle alors de « zoogéochimie » (Schmitz *et al.* 2018). La biodiversité joue un rôle dans les phénomènes de rétroaction climatique au-delà du cycle du carbone, en particulier, les changements dans la couverture végétale modifient les échanges locaux d'énergie entre la surface et l'atmosphère avec des rétroactions sur le climat régional, qui peut soit aggraver soit réduire le réchauffement (Perugini *et al.* 2017). Le réchauffement exacerbe les changements de composition des espèces de plancton, favorise les efflorescences de cyanobactéries et l'eutrophisation, qui à leur tour contribuent aux rétroactions milieu aquatique-atmosphère, en particulier par des changements dans les émissions de sulfure de diméthyle, un composant contribuant notamment à la formation d'aérosols et de production de nuages (Hopkins *et al.* 2020).

Ainsi mieux intégrer les interactions entre enjeux (biodiversité, climat, santé, etc) permettra de mieux identifier les actions et solutions les plus mutuellement bénéfiques pour ces différents enjeux.

5 Recommandation pour l'adaptation des sociétés au changement climatique préservant la biodiversité

5.1 Prendre en compte conjointement le changement climatique et la protection de la biodiversité

La capacité d'accueil de la biodiversité dans les futurs écosystèmes, naturels comme gérés, et la fourniture de services à la société pourraient être fortement réduits par le changement climatique et ses effets locaux directs. En effet, l'aggravation du changement climatique à partir du milieu du siècle pourrait annuler les bénéfices en termes de reconquête de la biodiversité s'il n'est pas considéré comme une menace majeure à prendre en compte en amont des programmes de restaurations ou de protection (Arneth *et al.* 2020). Mettre fin à l'extinction d'origine humaine des espèces menacées connues (cible 4 du cadre mondial adopté en décembre 2022), ne sera pas possible sans une politique ambitieuse de lutte contre le changement climatique. Le changement climatique doit ainsi être défini comme un défi prioritaire pour la biodiversité (Butchart *et al.* 2016).

Par ailleurs, sans objectifs ambitieux de protection de la biodiversité, le potentiel d'atténuation du changement climatique et d'adaptation des sociétés humaines ainsi que la réalisation de plusieurs ODD ne pourront pas être atteints. La biodiversité soutient directement la réalisation d'au moins 12 ODD³, voire 17 ODD après prise en compte des interactions indirectes (Blicharska *et al.* 2019). Dans le même temps, le changement climatique a le potentiel de compromettre 16 ODD (Fuso Nerini *et al.* 2019). Or, même de très faibles niveaux de réchauffement planétaire (de 1,5 °C à 2 °C) réduiront la taille de l'aire de répartition d'une fraction substantielle d'espèces les exposant à un risque élevé d'extinction.

Face aux grandes incertitudes sur la question de l'adaptation de la biodiversité au changement climatique et l'impact sur les services écosystémiques, l'expression du principe de précaution pourrait être de ne proposer que des mesures qui répondent à ces deux objectifs conjointement, tout particulièrement dans des territoires qui sont déjà soumis à de nombreuses pressions anthropiques, dont plusieurs sont intensifiées par le changement climatique. Il faut donc évaluer de manière critique les mesures d'atténuation et d'adaptation à l'aune de la protection de la biodiversité ou de la réduction des risques qui pèsent sur elle.

D'une manière générale, les 3 principales actions sans regret pour soutenir l'adaptation des écosystèmes au changement climatique sont :

- 1) Assurer la préservation des espaces à fort enjeu de biodiversité par un réseau d'aires protégées connectées
- 2) Maintenir et restaurer les processus qui génèrent l'hétérogénéité dans les habitats, les gènes et les communautés pour maintenir des options écologiques pour l'avenir.
- 3) Diminuer les pressions anthropiques qui aggravent les effets du changement climatique

Il faut également mieux comprendre le rôle dynamique de la biodiversité dans l'écosystème et les rétroactions climatiques lors de la conception de mesures et l'évaluation de leur succès potentiel pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

³ ODDs : 1 (pauvreté), 2 (faim), 3 (santé), 4 (éducation), 5 (genre), 6 (eau), 10 (inégalités), 11 (villes), 13 (climat), 14 (vie aquatique), 15 (vie terrestre), 16 (paix et justice)

Toutes les espèces ont une niche environnementale, et malgré les avancées technologiques, il est peu probable que les humains fassent exception. Pendant des millénaires, les populations humaines ont résidé dans la même étroite niche climatique disponible sur le globe, caractérisée par une température annuelle moyenne (MAT) de ~11 °C à 15 °C. Suivant la nature fondamentale de cette niche de température, la production actuelle de cultures et de bétail est largement limitée aux mêmes conditions, et, après analyse, le même optimum a été trouvé pour la production économique agricole et non agricole des pays. Dans un scénario de changement climatique de type *statu quo*, la position géographique de cette niche de température devrait se déplacer davantage au cours des 50 prochaines années qu'elle ne s'est déplacée depuis 6000 ans. En l'absence de migration, un tiers de la population mondiale devrait connaître une température annuelle moyenne supérieure à 29 °C actuellement trouvée dans seulement 0,8% de la surface terrestre de la Terre (principalement concentrée dans le Sahara) (Xu *et al.* 2020).

Dans un certain nombre de cas, l'adaptation naturelle de la biodiversité ne suffira pas, les services écosystémiques associés diminueront avec des impacts sur les humains. Il sera nécessaire de mettre en place des actions de gestion adaptative afin d'aider la biodiversité à supporter le changement climatique. Et dans tous les cas, ces stratégies d'adaptation ne pourront tenir sur le long terme sans une forte atténuation du changement climatique.

5.2 Pallier le déficit d'adaptation naturelle de la biodiversité

La plasticité du comportement de dispersion paraît très souvent insuffisante pour permettre des changements de distribution en réponse au déplacement géographique des habitats induit par un changement climatique, ce qu'on appelle la « traque à l'habitat ». Le cas le plus extrême est celui des arbres, pour lesquels la migration assistée pourrait être la seule solution qui permette à une espèce de suivre le déplacement des habitats qui lui sont favorables.

L'augmentation de la plasticité peut présenter un potentiel de « sauvetage évolutif » (Chevin & Lande 2010). Les démonstrations d'une évolution vers plus de plasticité dans des populations naturelles restent anecdotiques (Nussey *et al.* 2005), et l'on considère usuellement qu'une telle évolution vers plus de plasticité ne sera pas assez rapide pour suivre la vitesse attendue du changement des conditions écologiques, même si des exceptions existent, par exemple Higgins *et al.* (2014) ont montré qu'un papillon a adapté sa norme de réaction en moins de 40 ans suite à une augmentation des températures extrêmes.

5.3 Mettre en place une gestion adaptative favorisant le potentiel adaptatif

5.3.1 Populations sauvages

Pour les petites populations menacées par le changement climatique, trois types d'interventions peuvent prévenir leur extinction ; 1) renforcer l'effectif trop faible, 2) diminuer la consanguinité et augmenter la variabilité génétique, à l'aide de quelques migrants (voir le cas de la panthère de Floride), 3) assister la migration, ou déplacer une ou plusieurs populations vers des aires climatiques plus favorables.

Ces opérations, qui peuvent impliquer des « populations » captives, nécessitent plusieurs précautions ; éviter l'habituation au milieu de captivité, qui obère le retour en milieu naturel ;

éviter, dans le cas d'hybridation entre populations ou individus distinctes, les incompatibilités comportementales, physiologiques, génétiques, etc. Le renforcement de la connectivité d'habitats entre plusieurs populations non durables si prises isolément peut permettre d'élargir le patrimoine génétique à l'ensemble de la métapopulation ainsi créée, et ainsi d'entretenir une gamme d'allèles permettant de mieux réagir aux fluctuations de l'environnement. Le site choisi dans les cas de migration assistée doit faire lui aussi l'objet d'un choix raisonné prenant en compte notamment la qualité des habitats, leur disponibilité en ressources, la biodiversité locale, la réponse attendue des communautés humaines. Enfin, ces réponses ne sont pas définitives, et doivent souvent être maintenues à moyen terme ; par exemple, augmenter la variabilité génétique nécessite d'établir d'un flux migratoire récurrent tant que la population reste petite et isolée.

5.3.2 Agriculture

L'adaptation fait partie des stratégies de gestion du risque climatique en agriculture.

En milieu agricole, la situation diffère du milieu sauvage, en raison de la sélection active par les humains qui y appliquent leurs propres mécanismes d'adaptation qui peuvent être soit des adaptations incrémentales par des ajustements de pratiques, soit des transformations plus profondes des systèmes agricoles, des filières en place ou de la vocation des territoires.

L'adaptation peut être planifiée et concerner les aménagements (ouvrages hydrauliques, protection des côtes), la sélection végétale et animale, la relocalisation de certaines productions (vignobles, arbres fruitiers), la création d'infrastructures agro-écologiques (conservation des sols, plantations).

La recherche facilite enfin l'adaptation en évaluant les risques et les opportunités selon les scénarios, en fournissant des options et des technologies ainsi que des outils d'aide à la décision pour les exploitations, les filières et les territoires.

L'adaptation permet de gagner du temps en retardant les impacts négatifs du changement climatique et en maximisant les opportunités, liées notamment à des effets de substitution des productions. Néanmoins, l'adaptation incrémentale peut conduire à une impasse et retarder la transformation des systèmes agricoles, des filières et des territoires. L'adaptation constitue aussi, dans certains cas, un mécanisme qui permet de limiter l'expansion des superficies cultivées au détriment d'autres biomes (forêts, savanes, voire prairies naturelles et steppes). Cependant ces stratégies peuvent réduire le potentiel productif dans les années climatiques favorables. Il y a donc un compromis entre résilience aux aléas climatiques et productivité qui freine l'adoption de ce type d'adaptation.

Les adaptations sont très différentes entre les systèmes conventionnels et ceux traditionnels et familiaux. Dans les seconds, les stratégies d'adaptation mobilisent la biodiversité comme assurance face à l'aléa climatique :

- Diversité intra-spécifique, grâce à l'utilisation et à la conservation dynamique de ressources génétiques végétales et animales ;
- Diversité inter-spécifique par la diversification des assolements, en cultivant des associations végétales, en mettant en place des systèmes multi-strates (agroforesterie, permaculture, jardin créole), en utilisant des plantes de service, en associant plusieurs espèces animales (aquaculture, agropastoralisme).

Dans de nombreuses régions du monde, la dégradation des sols agricoles (perte de matière organique, érosion, salinisation, compactage, pollution) et la surexploitation des ressources en eau limitent le potentiel d'adaptation de l'agriculture. L'affaiblissement de la diversité biologique (nombre et diversité génétique des espèces cultivées et domestiquées, niches écologiques occupées, ampleur des interactions biotiques) pourrait renforcer la sensibilité des systèmes agricoles à la variabilité climatique, limitant ainsi leur capacité d'adaptation.

Stimuler l'activité de la biodiversité des sols repose sur quatre piliers :

- 1) limiter au maximum le labour qui détruit l'habitat de la faune ;
- 2) apporter des engrais organiques qui fournissent de l'énergie et des nutriments aux organismes du sol ;
- 3) entretenir une couverture permanente du sol afin qu'elle limite le stress thermique et hydrique direct et fournisse une ressource énergétique complémentaire aux organismes du sol et limite les aléas érosifs ;
- et 4) contrôler les bio-agresseurs par des mécanismes naturels pour éviter l'impact des produits phytosanitaires sur les organismes du sol.

Ces pratiques permettent d'améliorer la structure et la teneur en matière organique du sol renforçant la rétention et la percolation de l'eau. Elles permettent également de favoriser le stockage, la mobilisation et la fixation des nutriments par les activités microbiennes du sol et par des symbioses racinaires ainsi que le recyclage des matières organiques (effluents d'élevage, pâturage des cultures, compostage) renforçant l'activité de minéralisation du sol.

Grandes cultures

L'adaptation incrémentale concerne les pratiques agricoles (dates de semis et de récolte, fertilisation, irrigation, traitements phytosanitaires), les choix variétaux, les itinéraires techniques pour limiter la variabilité des rendements et stabiliser la qualité des produits.

L'adaptation de transformation pourrait passer par une diversification des rotations, des mélanges d'espèces, le recours à l'agriculture de conservation et à l'agroforesterie.

La diversité génétique favorise également l'adaptation, notamment grâce aux variétés traditionnelles de plantes cultivées par certains agriculteurs. Ces variétés ont une très grande diversité, avec des variations génétiques fonctionnelles, c'est-à-dire modifiant de façon détectable les phénotypes qui peuvent être localement sélectionnés pour favoriser l'adaptation à des variations de l'environnement.

Contrairement aux variétés conventionnelles, ces variétés restent dynamiques et sont donc généralement capables d'échanger des allèles avec d'autres variétés ou des plantes sauvages apparentées. En conséquence, elles peuvent donc acquérir des allèles fonctionnels par ces flux de gènes. Il peut s'agir d'hybridation avec des espèces plus éloignées ou de flux de gènes entre variétés au sein des mêmes espèces.

En plein champ, une sélection combinée par les conditions environnementales et les pratiques anthropiques s'opère, conduisant à continuellement adapter et faire évoluer les variétés pour les adapter aux variations environnementales. Ces processus ont conduit aux adaptations des différentes espèces à des climats très divers. Le maïs, plante naturellement tropicale, pousse dans les tropiques à basses altitudes mais jusqu'à 4 000 m dans les Andes, et des variétés sont adaptées aux hautes latitudes tempérées (Canada, Europe du Nord).

Élevage de ruminants

L'adaptation incrémentale concerne des modifications de conduite et de renouvellement du troupeau, la gestion des pâturages, la génétique animale et des aménagements des bâtiments d'élevage.

Pour les élevages à l'herbe, les transformations pourraient concerner le recours à des mélanges multi-espèces comprenant des légumineuses, l'agroforesterie et la création de parcours exploités durant les années sèches.

5.3.3 Pêche

En milieu marin, la préservation de la biodiversité des écosystèmes et de l'abondance des espèces est une solution pour conserver le potentiel d'adaptation aux effets du changement climatique et de la surexploitation, qui se superposent souvent.

L'approche écosystémique des pêches permet aujourd'hui de réconcilier exploitation et conservation des espèces en maintenant l'intégrité et la résilience des écosystèmes c'est-à-dire leur capacité à retrouver un fonctionnement normal après avoir subi une perturbation importante (comme par exemple après un ouragan ou une tempête). Cette approche est gagnant-gagnant, car des écosystèmes fonctionnels, intègres, sont plus productifs (voir Sala *et al.* 2021). Elle permet aussi de considérer l'exploitation halieutique dans un contexte élargi.

La préservation doit aussi considérer la diversité intra-spécifique (diversité qui existe entre les individus au sein d'une même population) pour favoriser l'adaptation à de nouvelles conditions environnementales. Plusieurs mesures peuvent être proposées :

- Protéger les habitats et les espèces sensibles (notamment les zones de ponte)
- Éviter certains engins de pêche destructeurs (tels les chaluts de fonds).

5.3.4 Forêts

L'adaptation de la sylviculture est souvent orientée vers la production de bois, avec des conséquences indirectes sur la biodiversité. Les choix de composition, de structure et de dynamique des peuplements forestiers sont effectués dans l'optique d'une production valorisée des décennies plus tard (Riou-Nivert 2015).

Plusieurs choix de gestion sont aujourd'hui en place :

- Augmentation de la part des essences à croissance rapide, principalement des résineux pour réduire le risque lié aux incertitudes climatiques ;
- Mise en place de peuplements d'essences mélangées par rapport aux monocultures pour augmenter la résilience de la forêt ;
- Diminuer l'indice foliaire des peuplements (c'est-à-dire la surface foliaire totale projetée au sol) afin de réduire la consommation en eau.

Ces choix de gestion ont des conséquences contrastées sur les volumes de bois à l'hectare et la biodiversité.

Les observations en situations naturelles ou expérimentales suggèrent que la productivité est plus élevée en mélange que dans les cultures pures, mais l'ampleur de cet effet, lié surtout à la diminution de la compétition intra-spécifique, dépend fortement de la nature des espèces mises en jeu et est modulé par la fertilité des sols, les méthodes de gestion et les conditions environnementales.

La résistance aux attaques d'insectes ou aux champignons pathogènes peut également être accrue en mélange car la colonisation des arbres hôtes, plus éparpillés, est ralentie et parce que la diversité des arbres augmente la probabilité de présence des ennemis naturels des ravageurs et pathogènes (Landmann *et al.* 2008).

Au niveau local, le maintien de couverts continus et fermés, en limitant les changements microclimatiques au sein des peuplements, retardera un temps les effets des changements du macroclimat sur les espèces des sous-bois et du sol.

A l'échelle des paysages, le déplacement de certaines espèces peut être favorisé en restaurant la connectivité entre massifs forestiers (trames vertes constituées de zones forestières continues, de réseaux de haies ou des zones agro-forestières) et, à l'intérieur des massifs, entre microhabitats favorables (Sordello *et al.* 2014). La migration assistée (déplacement artificiel des espèces) a déjà été pratiquée à large échelle depuis plusieurs siècles via les plantations forestières. Pour toutes les autres espèces de l'écosystème, c'est une action coûteuse, au résultat souvent aléatoire et ne pouvant concerner qu'un faible nombre de taxons.

5.4 Diminuer les pressions anthropiques

L'Ipbes établit que 5 pressions majeures pèsent sur la biodiversité et explique son érosion : le changement d'usage des sols, l'exploitation directe des ressources, le changement climatique, la pollution et les espèces exotiques envahissantes. Pour atténuer les effets du changement climatique et favoriser l'adaptation de la biodiversité, il faut aussi agir sur les quatre autres pressions. Réduire l'ensemble des facteurs de stress sur les écosystèmes est essentiel au maintien de leur capacité de résilience face au changement climatique, même si un certain nombre d'écosystèmes comme les récifs coralliens tropicaux, la forêt tropicale, les savanes, la toundra arctique, seront incapables de s'adapter au changement climatique même si les autres facteurs de stress sont réduits. L'adaptation des écosystèmes et de leurs usages au changement climatique constitue un levier de gestion des risques dès lors qu'elle permet de ne pas franchir les points de basculement des écosystèmes vers des états moins complexes, avec moins de fonctions et donc moins de services écosystémiques. Le non franchissement de ces seuils peut dépendre de certaines caractéristiques, comme la biodiversité, la connectivité, etc., mais aussi des autres pressions qui s'exercent sur les écosystèmes, car elles peuvent avoir des impacts cumulés.

La pression principale sur les milieux terrestres est le changement d'usage des sols. Lutter contre cette pression implique en particulier de limiter la fragmentation des habitats et de veiller à ce que les modifications d'occupation des sols n'agissent pas comme des barrières entravant la migration (Belle *et al.* 2016).

- Conserver et développer les continuités écologiques qui jouent un rôle de corridors climatiques
- Éviter toute création de nouvelles infrastructures qui viendraient réduire encore davantage la capacité de dispersion des espèces
- Engager des travaux de restauration écologique destinés à renforcer la résistance et la résilience des écosystèmes constitue des leviers pour préserver des écosystèmes fonctionnels et résilients face aux perturbations. Il s'agit par exemple du renforcement des trames vertes et bleues sur les territoires, qui permettent de faciliter les migrations des espèces, ou de l'accompagnement de la migration d'espèces peu mobiles en veillant au maintien de la diversité

génétique et se prémunissant de l'introduction et la diffusion d'espèces exotiques envahissantes (Efese, 2020).

5.5 Connaitre, comprendre et protéger la biodiversité

La protection passe avant tout par la connaissance et notamment, la connaissance des contributions que la biodiversité peut apporter à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique.

Dans un contexte d'une forte baisse de la biodiversité, quantifier le rôle de la diversité fonctionnelle dans tous les niveaux trophiques peut fournir des informations très pertinentes et permettre la conception de mesures de conservation comme l'expansion des aires protégées, la pêche durable ou le réensauvagement.

Il convient aussi de revoir la localisation et la délimitation des aires protégées qui ne sont pas adaptées pour s'aligner avec les changements à venir d'aires de répartition des espèces.

Un des outils disponibles est le renforcement (ou la création) de liens entre les valeurs sociétales et les valeurs de la conservation dans un contexte de changement climatique pour explorer les effets et mettre en œuvre les options sans regrets (Hernandez *et al.* 2019) en étant transparents sur les compromis entre enjeux, les gagnants et les perdants de la transition, ou des adaptations suites aux crises.

Il existe aussi des compromis entre différents objectifs de conservation (par exemple entre l'optimisation de fonctions, de ressources génétiques ou le maintien d'écosystèmes vierges) (Prober *et al.* 2019). Les connaître permet de mettre en œuvre des actions pour les minimiser.

5.6 Faire évoluer les politiques

Il est important de concevoir les politiques d'adaptation comme des politiques de prévention d'un risque systémique à venir, que ce risque soit principalement lié au changement du climat ou au déclin de la biodiversité et des contributions de la nature aux populations. A ce titre, il faut favoriser le dialogue et le consensus sociétal entre les décideurs politiques et d'autres parties prenantes clés.

En matières de ressources naturelles, la question de l'eau est centrale, à la fois pour les humains (nos activités), et les autres êtres vivants. Il faut en particulier réviser les modalités de gestion et de partage des ressources en eau dans un contexte de concurrence croissante entre milieux naturels, activités agricoles (Howden *et al.* 2007) et les autres usages comme les villes ou les industries.

Les politiques de lutte contre le changement climatique doivent également prendre en compte le rôle important des carnivores, des herbivores dans la modulation des réponses des écosystèmes au changement climatique pour éviter les erreurs d'appréciation importantes qui pourrait conduire à de mauvaises décisions.

Prendre plus directement en compte le changement climatique dans la formulation et la mise en œuvre des futurs objectifs de biodiversité présente des avantages connexes évidents pour traiter un large éventail de problèmes environnementaux et les défis sociétaux associés. Cela réduit également le risque que les mesures mises en place pour atteindre un objectif soient inefficaces en raison de la non prise en compte des rétroactions dues à la réponse de la biodiversité aux pressions cumulées.

Les objectifs de conservation doivent ainsi sortir d'une vision statique et prendre en compte les interactions complexes entre les processus écosystémiques, la composition atmosphérique et le climat. Ignorer les boucles de rétroactions entre le déclin des populations, la perte de diversité génétique, l'altération de la composition des espèces et le fonctionnement de l'écosystème peut conduire à sous-estimer les effets négatifs du changement climatique ou d'autres pressions environnementales.

Les politiques nationales doivent fixer des objectifs réalistes compte tenu des impacts inévitables du changement climatique futur sur la biodiversité, concevoir un processus de suivi des progrès vers la réalisation des objectifs internationaux et nationaux de réduction du changement climatique.

Au niveau international, les efforts doivent porter sur le renforcement des synergies entre les objectifs post2020, les ODD et l'Accord de Paris pour réduire la déconnexion entre les politiques climat, biodiversité et développement durable.

Améliorer le dialogue entre les conventions sur les changements climatiques (CCNUCC), sur Diversité biologique (CDB) et les plates-formes science-politique associées du GIEC Giec et de l'Ipbes. De même un meilleur alignement des conventions et les évaluations scientifiques pourraient également stimuler la décarbonisation urgente de l'économie et s'assurer que le changement climatique est minimisé par des actions qui profitent plutôt que de compromettre la protection de la biodiversité.

Les cibles du cadre mondial pour la biodiversité post2020 donnent des éléments supplémentaires pour améliorer la stratégie mondiale contre le changement climatique.

5.7 Eviter les écueils de l'atténuation du changement climatique terrestre

Malgré le large éventail d'avantages découlant de la limitation du réchauffement en dessous de 2 °C pour tous les écosystèmes et leur biodiversité, la manière dont l'atténuation du changement climatique sera mise en œuvre est aussi cruciale pour l'avenir des écosystèmes terrestres et aquatiques que la limitation du réchauffement lui-même.

L'atténuation semble plus durable que l'adaptation dans le sens où elle s'attaque à l'origine de la perturbation ; l'adaptation étant plutôt destinée à en gérer les effets. Des travaux montrent l'importance d'une action la plus précoce possible et l'importance de l'atténuation. En effet, des simulations de Warren *et al.* (2013) montrent que la perte de biodiversité serait 40 % moins importante si le pic des émissions survenait en 2016 plutôt qu'en 2030.

Des travaux récents montrent les actions visant à stopper l'érosion de la biodiversité bénéficient au traitement du problème du changement climatique (Shin *et al.* 2022), alors que certaines actions visant à atténuer le changement climatique présentent de forts risques pour la

biodiversité (et donc pour le changement climatique lui-même, à terme). Ainsi, le risque lié aux solutions de géoingénierie pour contrôler le climat peuvent avoir un effet contreproductif sur les politiques de préservation de la biodiversité et les comportements individuels : la capture des polluants ou autres gaz à effet de serre, par exemple, par des solutions technologiques seules, peut conduire les gouvernements et les individus à réduire leurs efforts en termes de réduction d'émission de polluants ou de GES, avec pour résultante une course en avant et une escalade des émissions demandant toujours plus de géoingénierie pour empêcher leurs impacts (Corner and Pidgeon 2014). L'intégration des enjeux de biodiversité dans ces stratégies semble plus qu'incertaine (Lawrence *et al.* 2018). De plus, McCusker *et al.* (2015) illustrent que certaines de ces technologies, bien que présentant un potentiel théorique d'atténuation des changements globaux, peuvent toutefois ne pas avoir les effets escomptés.

Plusieurs mesures importantes d'atténuation ont été identifiées comme étant en conflit avec la conservation de la biodiversité, l'approvisionnement de nombreux services écosystémiques et le bien-être humain (voir figure 2).

Table 3.1 Effects on biodiversity of selected (example) global climate mitigation and adaptation practices based on land and ocean management.

Ordered by maximum mitigation potentials. Practices often overlap, so are not additive (modified from Smith *et al.*, 2020; Roe *et al.*, 2019; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019; Barnes *et al.*, 2018). See these sources for further references, uncertainties and confidence levels. Estimates for measures in coastal and marine ecosystems are given for 2050 (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019) – estimates for 2030 can also be found in (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2019); estimates for land ecosystems are for ca. 2030-2050 (Smith *et al.*, 2020). Biodiversity impact: based on (McElwee *et al.*, 2020; Girardin *et al.*, 2021), together with judgement by authors, and Section 5. Under ‘Synopsis’, Adaptation is added with a question mark in cases for which no global estimates exist, but authors judge that an action would indeed contribute to societies’ adaptation to climate change. See footnotes for additional explanations.











































Practice	Summary/synopsis of overall expected impact	Mitigation potential	Adaptation potential (estimated number of people more resilient to climate change from intervention)	Biodiversity impact (positive unless otherwise stated)
A Land				
Increased food productivity		>13 GtCO ₂ e a ⁻¹	>163 million people	High ¹ or Low ²
Bioenergy and BECCS	 	0.4-11.3 GtCO ₂ e a ⁻¹	Potentially large negative consequences from competition for arable land and water	Negative/Low positive ³
Reforestation and forest restoration	  	1.5-10.1 Gt CO ₂ e a ⁻¹	> 25 million people	High
Afforestation	 	See Reforestation	Unclear	Negative/Low positive ³
Increased soil organic carbon content	  	0.4-8.6 GtCO ₂ e a ⁻¹	Up to 3200 million people	Medium
Fire management	 	0.48-8.1 GtCO ₂ e a ⁻¹	> 5.8 million people affected by wildfire; max. 0.5 million deaths per year by smoke	Low
Biochar addition to soil	 	0.03-6.6 GtCO ₂ e a ⁻¹	Up to 3200 million people; but potential negative (unquantified) impacts if arable land used for feedstock production	Low ⁴
Reduced deforestation and degradation	  	0.4-5.8 Gt CO ₂ e a ⁻¹	1-25 million people	High
Agroforestry	  	0.1-5.7 Gt CO ₂ e a ⁻¹	2300 million people	High
Enhanced weathering of minerals		0.5-4 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Insufficient data to make judgement
Restoration and reduced conversion of coastal wetlands	  	0.3-3.1 GtCO ₂ e a ⁻¹	up to 93-310 million people	High
Improved livestock management	  	0.2-2.4 GtCO ₂ e a ⁻¹	1-25 million people	Medium
Improved cropland management	  	1.4-2.3 GtCO ₂ e a ⁻¹	>25 million people	Medium
Improved and sustainable forest management	  	0.4-2.1 Gt CO ₂ e a ⁻¹	> 25 million people	High
Restoration and reduced conversion of peatlands	  	0.6-2 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	High
Improved grazing land management	  	1.4-1.8 GtCO ₂ e a ⁻¹	1-25 million people	Medium
Integrated water management	  	0.1-0.72 Gt CO ₂ e a ⁻¹	250 million people	Medium

Table 3 1

Practice	Summary/synopsis of overall expected impact	Mitigation potential	Adaptation potential (estimated number of people more resilient to climate change from intervention)	Biodiversity impact (positive unless otherwise stated)
Reduced grassland conversion to cropland		0.03-0.7 Gt CO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	High ⁵
Reduced soil erosion		Source of 1.36-3.67 to sink of 0.44-3.67 Gt CO ₂ e a ⁻¹	Up to 3200 million people	Low
Biodiversity conservation		0.9 GtCO ₂ e a ⁻¹	Likely many millions	High
Agricultural diversification		> 0	>25 million people	High
Management of invasive species/ encroachment		No global estimates	No global estimates	High
On-shore wind		Depends on substitution effect	No global estimates	Low
Solar panels on land		Depends on substitution effect ⁶	No global estimates	Low
B Demand changes (related to land)				
Dietary change		0.7-8 GtCO ₂ e a ⁻¹ (land)	No global estimates	High ⁷
Reduced post-harvest losses		4.5 GtCO ₂ e a ⁻¹	320-400 million people	Medium/High
Reduced food waste (consumer or retailer)		0.8-4.5 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Medium/High
Management of supply chains		No global estimates	>100 million	Medium ⁸
Enhanced urban food systems		No global estimates	No global estimates	Medium
C Ocean				
Ocean-based renewable energy		0.76-5.4 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Low
Carbon storage in seabed		0.5-2.0 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Low
Fisheries, aquaculture and dietary shifts		0.48-1.24 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Medium/High
Costal and marine ecosystems		0.5-1.38 GtCO ₂ e a ⁻¹	No global estimates	Medium/High

Mitigation potential
 Adaptation potential
 Possible adaptation potential
 Negative impacts on biodiversity
 Positive impacts on biodiversity

1. If achieved through sustainable intensification;
2. If achieved through increased agricultural inputs;
3. If small spatial scale and (for bioenergy) second generation bioenergy crops;
4. Low if biochar is sourced from forest ecosystems, application can be beneficial to soils locally;
5. If conversion takes place in (semi-)natural grassland;
6. See Creutzig *et al.* (2017) for a recent summary of energy potentials;
7. Due to land sparing;
8. Related to increased eco-labelling, which drives consumer purchases towards more ecosystem-friendly foods.

Figure 2: effets attendus de différentes actions d'atténuation et d'adaptation au changement climatique dont leurs impacts, positifs ou négatifs, sur la biodiversité

5.7.1 Les cultures bioénergétiques

Les écosystèmes terrestres absorbent environ 30 % des émissions anthropiques, ce qui conduit à proposer de capter massivement ce CO₂ via des cultures bioénergétiques ou par l'expansion de la superficie forestière, pour limiter le réchauffement à 1,5°C (Rogelj *et al.* 2018). Or :

- Cette stratégie nécessite la conversion de terres à hauteur d'un tiers des terres actuellement utilisées à des fins agricoles ou l'augmentation de 10 à 15% des surfaces des forêts.
- Cette stratégie induira des tensions sur les terres, notamment les espaces naturels ou protégés, certaines terres agricoles, et pourrait amener à des pertes de biodiversité (Ohashi *et al.* 2019) aussi sévères que dans les scénarios à hautes émissions de GES (Hof *et al.* 2018).
- Elle aggraverait donc la faim et induirait la perte de services écosystémiques avec comme conséquences une moindre disponibilité d'eau potable ou d'air pur (Ipbes 2018b, IPCC 2019a, Fuss *et al.* 2018).
- Des études comme celle de Harper *et al.* (2018) ont émis de sérieux doutes quant à la crédibilité de ces projections d'absorption de carbone sur les terres aux échelles massives proposées.

5.7.2 La diffusion de particules dans l'atmosphère pour refroidir la terre (SRM pour *Solar Radiation Modification*)

Plus il y a de particules dans l'atmosphère, plus l'albédo terrestre augmente, plus la quantité d'énergie arrivant au sol est limitée, et donc moins la terre se réchauffe. Mais ces techniques sont à risque pour la biodiversité, et donc à terme pour l'espèce humaine également (Trisos *et al.* 2018, Zarnetske *et al.* 2021).

La figure 3 ci-dessous (Pörtner *et al.* 2021) illustre que certaines gammes d'actions d'atténuation du changement climatique sont délétères pour les actions de lutte contre la perte de biodiversité, alors que l'inverse est nettement moins vrai. Ceci indique que les solutions bénéfiques pour la biodiversité ont plus de chances de présenter également des avantages pour atteindre d'autres objectifs que des actions visant des objectifs climatiques.

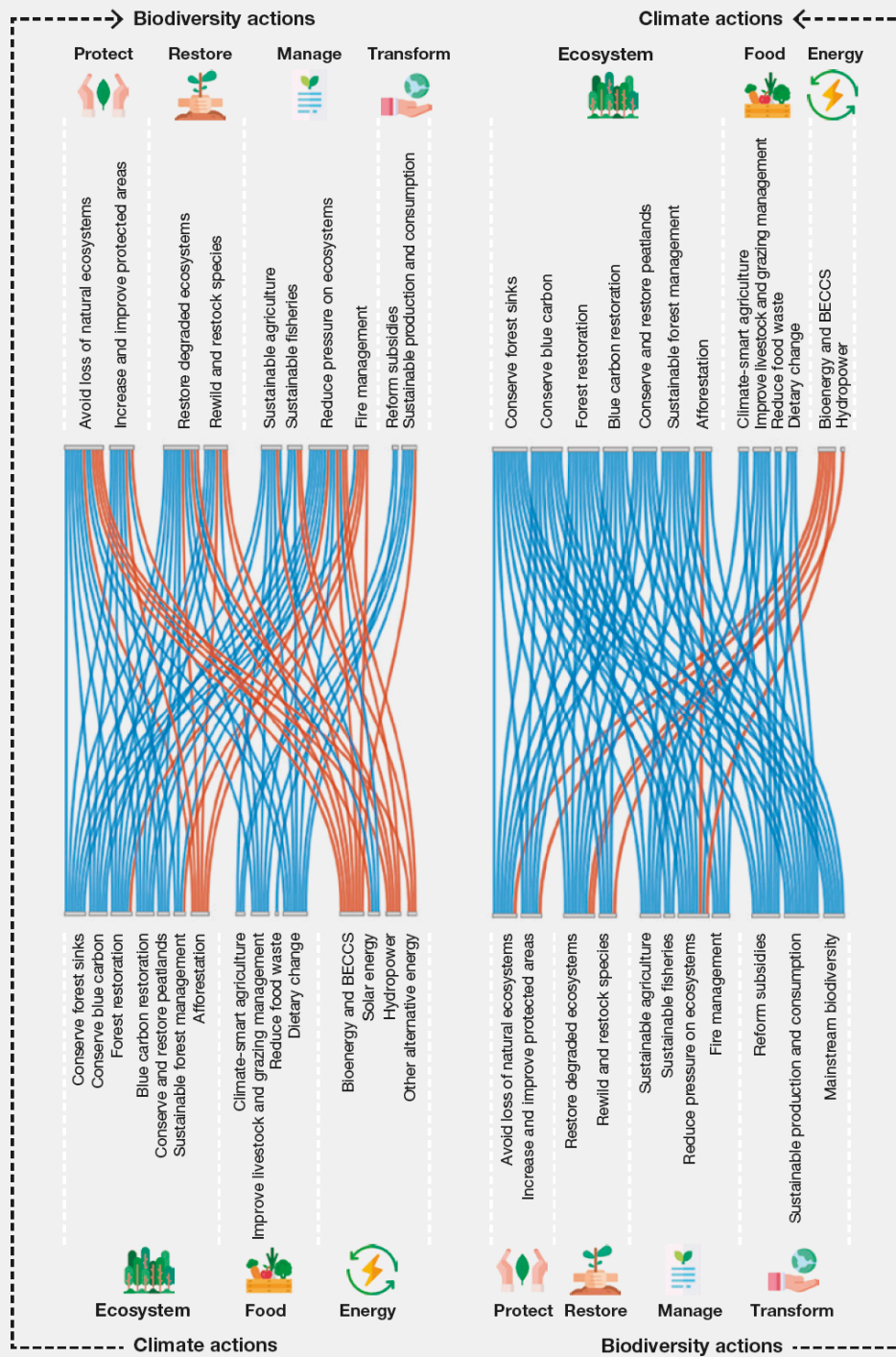


Figure 7 2 Sankey diagram mapping the effects (positive and negative) of actions to mitigate climate change on actions to mitigate biodiversity loss (top), and of actions to mitigate biodiversity loss on actions to mitigate climate change (bottom).

Blue lines represent positive effects, while orange lines represent negative effects. This network of interaction is evolving as many of the solutions are still in the ideation phase or have not yet been deployed at any sizable scale. Likewise, the strength of interactions may shift over time as the scale of solutions moves beyond the threshold at which unforeseen interactions, positive or negative, may occur.

Figure 3 : effets d'actions climatiques sur la biodiversité et effets d'action biodiversité sur le climat

5.8 Privilégier les solutions fondées sur la nature

Eviter une nouvelle conversion des écosystèmes naturels dans les terres gérées devrait être une priorité absolue afin de maintenir les puits de carbone et d'éviter d'importantes émissions de carbone.

D'une manière générale, les systèmes de production et de consommation dominants actuels ont produit les pressions sur les espèces, les écosystèmes et l'environnement amenant à une accélération de la dégradation de la nature et du capital qu'elle représente pour les sociétés humaines. Les Solutions Fondées sur la Nature existent ou peuvent être imaginées dans l'ensemble des secteurs d'activités. Cependant, les activer nécessite une transition depuis ces anciens systèmes et basculer nos investissements dans ces SFN, partant des principes généraux suivants :

- i) L'inertie du système Terre impose une action de transition rapide et massive afin de raccourcir la durée de perturbation globale, dans le respect des générations à venir ;
- ii) Tout retard dans la mise en place de ces SFN réduira les options de restauration de la biodiversité et des services écosystémiques et augmentera le coût de la transition alors que le capital économique mondial sera lui en régression ;
- iii) Plus les modèles diffèrent de la situation actuelle ou de référence, moins ils sont fiables, et il est ainsi plus probable que le scénario à 1,5 °C corresponde à ce qu'il se passera effectivement que celui à 4,5°C pour lequel les conditions seront nettement différentes d'aujourd'hui ;
- iv) L'évolution de la dégradation de la nature et de l'état de l'environnement peut connaître des effets de seuils et d'emballement identifiés ou inconnus qui pourraient rendre les conditions environnementales futures plus extrêmes qu'estimées par les modèles.

Étant donné que l'utilisation des terres a contribué en moyenne à 23 % des émissions annuelles totales de CO₂, N₂O et CH₄, il est essentiel que les processus écosystémiques soient correctement pris en compte, pour construire des mesures d'atténuation basées sur les écosystèmes ayant des co-bénéfices importants et rentables avec les objectifs de conservation, la fourniture de multiples services écosystémiques et le bien-être humain.

Ces mesures doivent être accompagnées de modifications et de réductions de la consommation par habitant dans les pays à revenu élevé (IPCC 2019, Seddon *et al.* 2019, Donatti *et al.* 2019).

La gestion des ressources naturelles et les mesures de conservation pourraient ainsi être renforcées par des approches synergiques avec les solutions d'ingénierie de l'atténuation du changement climatique.

Les Solutions fondées sur la nature fonctionnent : sur 109 évaluées par Key *et al.* (2022) et mises en place pour lutter contre le changement climatique, 88 % de ces interventions ayant des effets positifs pour l'adaptation au changement climatique ont aussi des effets bénéfiques sur la santé des écosystèmes : même si la diversité fonctionnelle est rarement évaluée, ni faite la distinction entre végétaux natifs ou non.

Les choix réglementaires et techniques doivent s'attacher à promouvoir des solutions synergiques et mutuellement bénéfiques entre les options technologiques et les solutions basées sur la nature et éviter les solutions d'ingénierie climatique néfastes pour la biodiversité (voir figure 4).

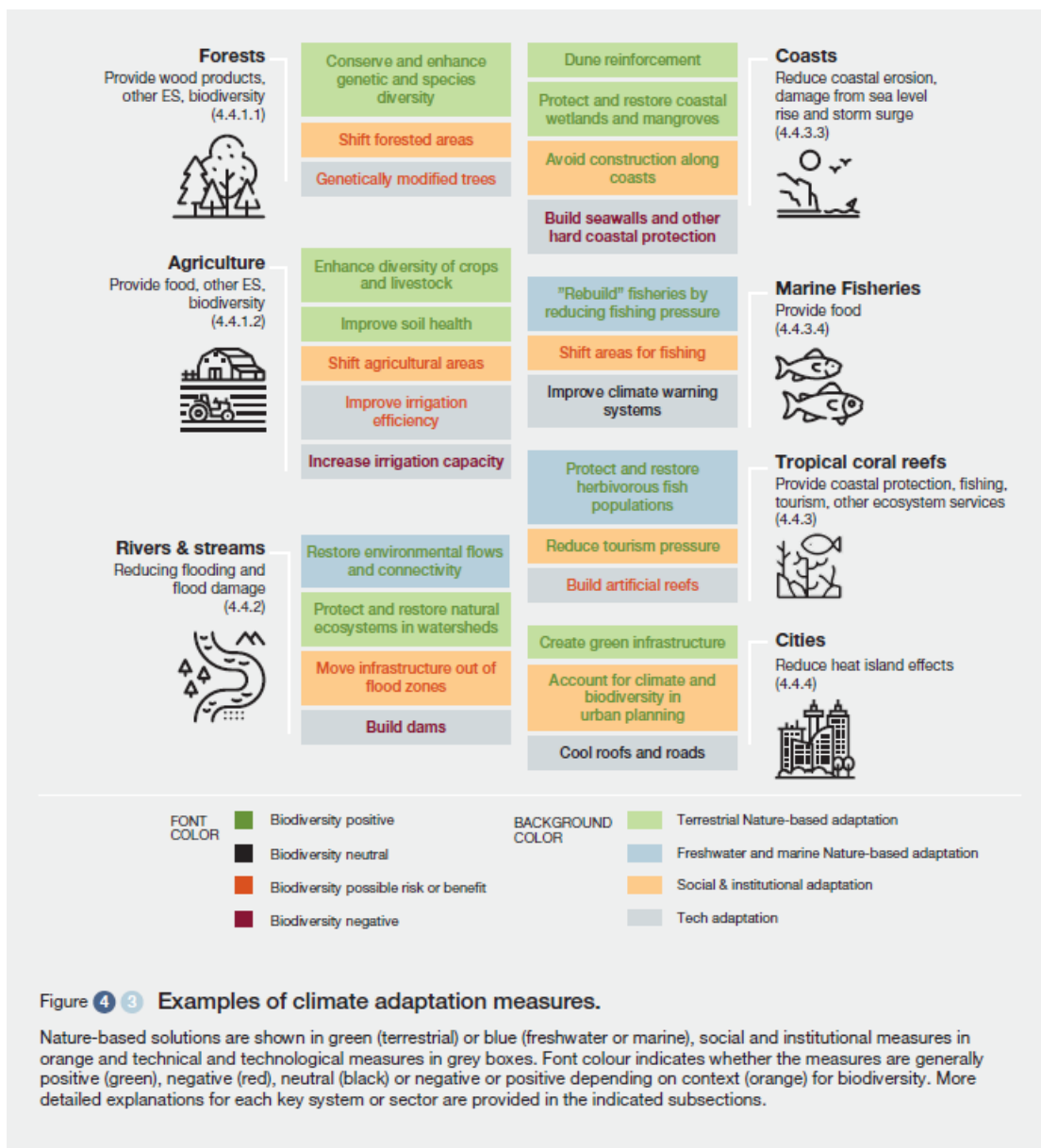


Figure 4 : exemples de mesure d'adaptation climatique

5.9 Recommandations pour la gestion adaptative des forêts

Hagerman & Pelai (2018) ont recensé certaines mesures fréquemment proposées comme recommandations pour la gestion adaptative des forêts :

Stratégies de gestion pour augmenter et/ou gérer la résilience des systèmes forestiers :

- Plantations plurispécifiques et augmentation de la diversité génétique et en priorisant les essences locales ;
- Augmenter leur connectivité ;
- Favoriser les processus de régénération naturelle ;
- Modifier les périodes de récolte.

Renforcement des capacités associées aux connaissances scientifiques et à l'incertitude :

- Augmenter le monitoring ;
- Améliorer l'accès aux nouvelles connaissances et à une information plus robuste, dont les savoirs locaux et traditionnels ;
- Développer une compréhension technique du risque écologique ;
- Conduire davantage d'évaluations d'incertitudes et de vulnérabilité.

Planification et prise de décision :

- Mettre en place une approche de gestion adaptative (i.e. évaluation régulière des progrès, correction si nécessaire, et flexibilité) ;
- Développer des solutions mieux adaptées aux conditions écologiques locales ;
- Incorporer le changement climatique dans les objectifs de gestion en cours ;
- Augmenter le nombre, l'autonomie, et le soutien aux initiatives forestières locales et communautaires ;
- Impliquer plus activement les propriétaires forestiers dans les processus ;
- Intégrer les connaissances et les croyances des parties prenantes dans des processus de prise de décision dynamiques.

Renforcer ou développer de nouveaux partenariats :

- Améliorer la coordination inter-agences et intersectorielle ;
- Augmenter les collaborations entre agences et la société civile avec les parties prenantes.

Réformer les politiques :

- Développer des cadres réglementaires flexibles ;
- Modifier les guides de bonnes pratiques sur les transferts de graines et l'éclaircissement des forêts.

5.10 Donner la priorité aux mesures adaptatives face aux futurs changements climatiques dans les systèmes de production agricoles européens

D'après Zhao *et al.* (2022), selon les zones :

- Atlantique :
 - o Utilisation de cultivars adaptés à des climats plus chauds et plus secs et autres cultivars « *climate-proof* » ;
 - o Technologies d'économies d'eau ;
 - o Protection de la fertilité et contre l'érosion des sols ;
 - o Monitoring des sécheresses, des ravageurs et des pathogènes ;
 - o Assurances-récoltes ou équivalents ;
 - o Nouvelles espèces pour les saisons chaudes ;
 - o Rotations des cultures pour une meilleure utilisation des nutriments ;
 - o Révision des réglementations environnementales ;
 - o Augmentation des capacités de stockage des productions.
- Continentales :
 - o Modification des pratiques à la parcelle ;
 - o Modification des protections des cultures ;

- Utilisation de cultivars adaptés à des climats plus chauds et plus secs et autres cultivars « *climate-proof* » ;
 - Technologies d'économies d'eau ;
 - Protection de la fertilité et contre l'érosion des sols ;
 - Monitoring des sécheresses, des ravageurs et des pathogènes ;
 - Révision des schémas de subventions.
- Méditerranéenne :
- Assurances-récoltes ou équivalents ;
 - Nouvelles espèces pour les saisons chaudes ;
 - Rotations des cultures pour une meilleure utilisation des nutriments et de l'eau ;
 - Modification des paysages (haies, bandes tampons) ;
 - Révision des réglementations environnementales et des schémas de subventions ;
 - Augmentation des capacités de stockage des productions.

5.11 Recommandations en matière législative et réglementaires pour protéger la biodiversité et augmenter sa résilience en contexte de changement climatique

- ⇒ **Établir une nomenclature pour définir ce que recouvrent les différents statuts des aires protégées.**
- ⇒ **Créer de nouvelles zones protégées en Métropole et Outre-mer.**
- ⇒ **Mettre en place une fiscalité spécifique aux atteintes à la biodiversité afin de financer le fonctionnement des aires protégées.**
- ⇒ **Mettre fin aux fiscalités et subventions ayant un impact négatif sur les objectifs poursuivis en matière de biodiversité.**
- ⇒ **Faire évoluer les mécanismes budgétaires pour donner plus de moyens aux collectivités d'agir en faveur des aires protégées.**
- ⇒ **Imposer des mesures de restauration à la charge de tous les propriétaires ainsi qu'aux usagers et exploitants avec des aides de l'État ou des collectivités territoriales, le cas échéant, mobilisation de la part départementale de la taxe d'aménagement.**
- ⇒ **Intégrer la valeur intrinsèque de la biodiversité dans les codes de l'environnement et le code rural et de la pêche maritime en déclinaison de la charte de l'environnement.**
- ⇒ **Créer des servitudes environnementales définitives ou temporaires sur la propriété foncière, y compris dans le cas d'intérêt général majeur, sans avoir besoin de l'accord du propriétaire ». Ces servitudes pourraient faire l'objet de paiement d'une indemnité annuelle ou forfaitaire.**
- ⇒ **Interdire l'importation de bois des pays qui n'ont pas de réglementation forte sur la Biodiversité.**
- ⇒ **Élaborer une stratégie nationale sur les impacts du tourisme exporté, qui pourra être négocié avec les grandes compagnies de tourisme (par ex. Club-Med, Ponant) pour établir une éthique du tourisme.**
- ⇒ **Adopter la réglementation de l'accès aux sites naturels très fréquentés comme prévu par la proposition de loi « Bignon" du 21 novembre 2019 ». Elle devra être accompagnée**

par un travail sur une sensibilisation des acteurs sur les impacts des activités touristiques et la définition d'un tourisme durable.

- ⇒ Exclure l'usage d'espèces exotiques envahissantes dans les jardins et les politiques de retour de la nature en ville, interdire leur commerce et renforcer l'information du grand public, notamment par une meilleure communication sur le centre de ressources sur les espèces exotiques envahissantes. Allouer un budget spécifique pour la lutte contre les espèces envahissantes au niveau des collectivités territoriales.
- ⇒ Protéger juridiquement les variétés anciennes et le patrimoine génétique des espèces cultivées et domestiques en France, notamment par l'extension de la portée du registre des « variétés de conservation » annexé au Catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées depuis l'arrêté du 16 décembre 2018.
- ⇒ Reconnaître et subventionner les actions favorables à la biodiversité (jachère, implantation de haies, de mares, préservation de zones sans intervention humaine où la biodiversité peut évoluer librement restauration des zones humides).
- ⇒ Promouvoir les paiements pour services environnementaux (voir par exemple la nouvelle politique agricole anglaise).
- ⇒ Favoriser l'essor de mécanismes contractuels de protection et de gestion de la biodiversité permettant d'offrir des garanties à long-terme pour les agriculteurs.
- ⇒ Définir des droits à l'eau en fonction des différents besoins, y compris pour les écosystèmes naturels.
- ⇒ Introduire un objectif de réduction de l'empreinte écologique de la France à hauteur de sa biocapacité.
- ⇒ Taxer les pesticides et intrants toxiques en fonction de leur niveau d'écotoxicité.
- ⇒ Introduire des critères de biodiversité dans l'ensemble des labels et appellations agricoles au sens large (y compris viticole ou arboricole).
- ⇒ *Rendre obligatoire* un pourcentage de repas bio, local et de saison dans les cantines scolaires en remontant le point 2° de l'article L230-5-1 « Ou issus de l'agriculture biologique ... » en début de paragraphe avant l'énumération des autres types de produits qui ne concourent pas nécessairement à la préservation de l'environnement.
- ⇒ Restreindre le droit d'accès aux zones de pêche françaises pour les navires ne respectant pas des principes de pêche durable ou des navires dont l'empreinte environnementale dépasse un seuil fixé par la réglementation.
- ⇒ Limiter strictement la pêche d'espèces pour lesquelles le rendement maximum durable (RMD) n'a pas encore été calculé.
- ⇒ Supprimer les subventions aux pêcheries non durables et néfastes à la biodiversité marine et instaurer une taxe sur les carburants des navires.
- ⇒ Instaurer une aide financière pour l'achat d'équipements moins néfastes pour la biodiversité marine.
- ⇒ Créer un label valorisant les circuits courts pour les métiers de transformation des produits de la pêche.
- ⇒ Créer un écolabel public européen certifiant le poisson issu d'une pêche durable.
- ⇒ Instaurer des circuits courts en aquaculture, avec des systèmes basés sur les espèces locales et un nourrissage évitant ou réduisant les farines de poissons au profit de farines composées d'algues⁵¹ ou d'insectes.
- ⇒ Favoriser les circuits courts de vente pour les pêcheries de petite taille, artisanales et familiales, valoriser économiquement leurs produits afin d'assurer un prix juste et équitable et réserver l'accès côtiers à des navires de petite taille.

- ⇒ Généraliser la prise en compte des atteintes à la biodiversité ordinaire dans les processus d'autorisation.
- ⇒ Contrôler plus strictement le recours au C de la séquence ERC (qui se fait souvent au détriment du E et du R).
- ⇒ Pour tout nouveau projet (1) Justifier sa pertinence par rapport aux besoins du territoire, (2) Intégrer les enjeux environnementaux et les spécificités écologiques du territoire le plus en amont possible des projets, de façon qualitative, (3) Renforcer la concertation avec les différents acteurs du territoire pour avoir une vision plus globale des enjeux sur le territoire et développer une approche pluridisciplinaire en intégrant la communauté des experts et des scientifiques pour améliorer les connaissances écologiques des parties prenantes des projets d'infrastructures.
- ⇒ Rendre obligatoire l'utilisation des coefficients de biotope ou de préservation des corridors écologiques afin de viser à l'intégration d'espaces verts de qualité (moins traités, moins anthropisés) où la biodiversité est fonctionnelle (par exemple des éco-pâturages) selon un seuil calculé en fonction de la taille des villes (utiliser par exemple la méthode des sociotypes développée en Suède en prenant en compte les situations locales et les contextes sanitaires (allergies)).
- ⇒ Mettre en place une directive cadre sur les sols en s'appuyant sur des outils scientifiquement robustes et définir un référentiel multicritère de qualification des sols
- ⇒ Créer une Agence des sols.
- ⇒ Prendre en compte la qualité des sols pour déterminer les capacités d'urbanisation dans un territoire afin de protéger les sols qui présentent le plus de fonctions écologiques.
- ⇒ Supprimer les exonérations de la taxe d'aménagement afin d'inciter à une utilisation raisonnée des sols aux fins de construction et d'aménagement, quel que soit le bénéficiaire de ces constructions et aménagements.
- ⇒ Instaurer une taxe sur les bureaux vacants.
- ⇒ Développer « un système de comptabilité écologique à l'échelle des organisations (comptabilité d'entreprise), des écosystèmes (comptabilité biophysique) et des pays (comptabilité nationale) qui rendent visibles les dettes écologiques engendrées vis-à-vis de la nature et permettent de redéfinir ce qui peut être entendu par création de richesse (objectif 2.3 d'Aïchi) ».
- ⇒ Rendre obligatoire l'adoption de plans de protection et de reconquête de la biodiversité à une échelle territoriale pertinente (par exemple l'échelle intercommunale du SCoT), les doter d'engagements chiffrés et mettre en compatibilité tous les autres documents d'urbanisme par rapport à ces plans.
- ⇒ Mettre en place un système de fiscalité écologique qui puisse utiliser comme assiette fiscale la comptabilité écologique, avec des avantages fiscaux pour les entreprises mettant en place une telle comptabilité et des objectifs d'augmentation de l'actif environnemental pour pouvoir prétendre à une exonération.
- ⇒ Supprimer explicitement les subventions dommageables à la biodiversité avec une programmation en fonction de leur maturité par grands domaines budgétaires et par grands percepteurs (Etat, collectivités locales et sécurité sociale).

ANNEXE : TABLEAU DE SYNTHÈSE DES IMPACTS SUR LES ECOSYSTEMES FRANÇAIS ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES ASSOCIES, AINSI QUE SUR LES FILIERES CONCERNEES, ET LES RECOMMANDATIONS POUR L'ADAPTATION DE LA BIODIVERSITE POUR DES NIVEAUX DE RECHAUFFEMENT MODERES (+2°C) OU IMPORTANTS (+4°C)

Remarque préliminaire : Il existe des « actions sans regrets » qui sont favorables à la biodiversité et aux services écosystémiques quel que soit le contexte. Ces actions peuvent être synthétisées en trois grandes catégories :

1. **Garantir une protection forte sur au moins 30% des terres et des mers d'ici 2030, et 50 % d'ici 2050.** La protection forte implique la réglementation des activités humaines pour qu'elles aient peu ou pas d'impact sur la biodiversité. Ces aires protégées doivent être connectées entre elles. En effet, l'absence de continuité écologique est la première cause limitant l'adaptation des espèces au changement climatique
2. **Diminuer les facteurs directs et indirects de pression** sur la biodiversité et ce sur tous les territoires et dans tous les écosystèmes, des écosystèmes naturels aux écosystèmes les plus anthropisés : changement d'usage des sols, exploitation directe des ressources naturelles, changement climatique, pollution, espèces exotiques envahissantes, consommation de masse, commerce international, gouvernance, conflit, épidémies etc.
3. **Maintenir ou restaurer les processus qui génèrent l'hétérogénéité** dans les habitats, les gènes et les communautés afin de maintenir les options écologiques pour l'avenir (par exemple via des paysages diversifiés, riches en habitats et en biodiversité, connectés).

Type d'écosystème	Tous écosystèmes
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Déplacements espèces Extirpations, Déstabilisation réseaux écologiques Perte de la qualité des habitats, de la structure de la végétation Pertes des diversités génétiques, phénotypiques, fonctionnelle et de la diversité des interactions biotiques Désynchronisation entre des espèces interdépendantes comme les plantes et leurs pollinisateurs, ou des oiseaux insectivores et leurs proies au moment où leur progéniture doit être en pleine croissance</p> <p>Un réchauffement de 2°C (RCP2.6) fera évoluer les écosystèmes comme ils étaient pendant la période la plus extrême de l'Holocène (il y a 4700 ans B.P.), avec un changement de 12 à 15 % des écosystèmes correspondant notamment à une régression des zones boisées dans le sud de la Méditerranée associée à l'expansion du désert. Le scénario RCP4.5 induit l'extension du désert vers l'Afrique du Nord, la régression des forêts alpines et l'extension de la végétation sclérophylle méditerranéenne. Dans le scénario RCP8.5, tout le sud de l'Espagne se transforme en désert, les forêts de feuillus envahissent la plupart des montagnes et la végétation méditerranéenne remplace la plupart des forêts de feuillus dans une grande partie du bassin méditerranéen.</p> <p>Le quart des espèces qui peuplent actuellement les 35 écorégions étudiées sont menacées d'extinction à +2°C (Warren <i>et al.</i> 2018). Même avec un réchauffement de 1,5 à 2°C, les aires de distribution de la majorité des espèces terrestres devraient se contracter de</p>

	<p>manière importante (Warren <i>et al.</i> 2019, Díaz <i>et al.</i> 2019, Nunez <i>et al.</i> 2019). Toutefois, passer de +2 à +1,5°C pourrait diminuer de 50% le nombre d'espèces menacées par le déplacement de leurs aires de répartition (Smith <i>et al.</i> 2018).</p> <p>La moitié des espèces qui peuplent actuellement les 35 écorégions étudiées sont menacées d'extinction à +4°C (Warren <i>et al.</i> 2018).</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	<p>Diminution de la productivité primaire nette et de la stabilité de la productivité primaire</p> <p>Pollinisation</p> <p>Diminution de la résilience, notamment de la végétation (qui a du mal à se déplacer) (observé pour les forêts)</p> <p>Diminution des régulations des compartiments (eau, air, sols) ou des pathogènes à potentiel zoonotique</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	<p>Les conséquences pour les humains sont la perte de services écosystémiques comme la perte de capacité des écosystèmes à stocker du carbone (mangroves, forêts, prairies), la perte de capacité de protection du trait de côte face à la montée des eaux (mangroves), des baisses de productivité agricoles (jusqu'à 10% actuellement, 50% en 2050) et forestières, la baisse des rendements de pêche.</p> <p>Perte de biomasse (production alimentaire, de matériaux, énergie), dégradation des milieux qui connaîtront des pertes de régulation par la biodiversité</p> <p>Perte de diversité culturelle et patrimoniale</p> <p>Hausse des émergences zoonotiques</p> <p>Les nouvelles synchronies entre hôtes et parasites ou maladies a des impacts sensibles sur la production agricole et forestière</p>
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>Bien distinguer les 'néo-natives' des 'exotiques'</p> <p>Parmi les exotiques, préserver les remédiatrices (contribuant à l'adaptation)</p> <p>Les efforts de protection doivent porter en particulier sur les espèces les plus fragiles: les espèces spécialisées, peu plastiques, à démographie lente, mégafaune (grands mammifères et reptiles terrestres et marins, grands rapaces et oiseaux de mer...) et sur les écosystèmes les plus sensibles (zones humides, milieu marin, points chauds de la biodiversité, notamment les DOM- TOM...)</p> <p>Diminuer la fragmentation des milieux.</p> <p>Poursuivre les efforts de recherche pour mieux anticiper les effets du changement climatique et notamment: soutenir et développer des observatoires de la biodiversité, développer des scénarios et des modèles capables de prédire les dynamiques des écosystèmes</p> <p>Combiner land sharing et land sparing : L'option « land sharing » (c'est-à-dire du partage de la terre) propose un paysage aménagé polyvalent qui combine production et conservation des écosystèmes, par exemple en associant des cultures et des arbres (agroforesterie), en juxtaposant des usages divers de la terre dans des mosaïques paysagères qui incluent des zones sauvages, en favorisant les infrastructures écologiques comme les haies, les ripisylves, les fossés de drainage et en respectant la variabilité</p>

	topographique des lieux cultivés plutôt que d'uniformiser le paysage. Cette option présente des avantages dans un contexte de changement climatique (Torquebiau, 2015). Cependant les grands espaces protégés proposés dans le « land sparing » sont également importants pour garantir les mécanismes écologiques d'adaptation, protéger des réservoirs de biodiversité et conserver des services écosystémiques importants aujourd'hui ou dans le futur
Recommandations pour les changements importants (4°C)	

Type d'écosystème	Sols
Impacts du cc sur la biodiversité	En l'espace de 170 ans les espèces de champignons décomposeurs et mutualistes ont retardé leur fructification de deux semaines au cours d'une période où le climat a également changé (distribution des pluies et température). (Institut de botanique de Montpellier) Pour des températures d'exposition inférieure à 50 °C, le nombre de degré-jour et la disponibilité du substrat conditionne l'activité des communautés microbiennes. Pour des températures supérieures, la relation n'est plus linéaire, on constate un accroissement de la respiration durant les premiers instants de l'exposition à ces hautes températures alors que la biomasse microbienne décroît. Aggravation de la dégradation des sols, notamment perte en eau
Impacts sur les services écosystémiques associés	Perte des relations multi-trophiques avec baisse de productivité, diminution de la capacité de recyclage des nutriments et du carbone Augmentation de la surface des terres arides et semi-arides, affectant les milieux naturels comme les espaces agricoles Perturbation des processus écosystémiques associés tels que la nutrition des arbres, le stockage de l'eau, la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments (Castaño <i>et al.</i> 2018).
Impacts pour la société et les secteurs économiques	Baisse des rendements agricoles et forestiers Déstockage de carbone = émissions de CO ₂ par respiration bactérienne Perte de rendement agricole, voire impossibilité de cultiver. L'ipbes (2018a) indique qu'en 2050, sous les pressions cumulées de la perte de biodiversité et du changement climatique de 50 à 700 millions de personnes seraient amenées à migrer en raison de l'impossibilité de produire de la nourriture sur des terres dégradées
Recommandations pour les	Adaptation des pratiques agricoles dans les parcelles cultivées (réduction du travail du sol, réduction des pesticides, rotation des cultures) Agroforesterie et recréation des espaces semi-naturels en milieu agricole (Kay et al 2019)

changements modérés (2°C)	Conservation ou rehabilitation du potentiel de stockage de carbone par les sols comme préalable à la lutte contre le changement climatique et condition nécessaire à la possibilité d'en dégager des services écosystémiques apportées par les fonctions du sol
Recommandations pour les changements importants (4°C)	

Type d'écosystème	Forêts
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Allongement de la durée de saison de végétation, date de débournement des feuilles, floraison (Thackeray <i>et al.</i> 2016)</p> <p>Les peuplements arborés seront parmi les plus lents à suivre le déplacement de leur niche climatique, avec des risques marqués de déséquilibre végétation-climat pour des décennies ou des siècles.</p> <p>Remontée en altitude des espèces de sous-bois corrélée à la température (Lenoir <i>et al.</i> 2008)</p> <p>La surface occupée par les espèces à taux de dispersion limitée va diminuer.</p> <p>Une hausse moyenne de 2°C pourrait étendre le domaine méditerranéen jusqu'à la Loire (Efese, 2018).</p> <p>En région méditerranéenne, 22 espèces non menacées de plantes en 2014 devraient l'être en 2015 sous le scénario RCP8.5 dont 30 à 45 % en danger critique, perdant plus de 80 % de leur aire de distribution, selon le scénario RCP 4.5, 67 à 95 % seraient menacées d'ici 2050 dont 5 à 13 % en danger critique (Casazza, 2014).</p> <p>Parmi les habitats tempérés les plus altérés, les ripisylves (forêts bordant les cours d'eau) ont subi des pertes importantes dans la majeure partie du réseau fluvial européen, affectées notamment par les modifications des réseaux hydrologiques (Janssen <i>et al.</i> 2016).</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	<p>L'augmentation de la production photosynthétique liée à l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle est estimée à 6 % (Nemani <i>et al.</i> 2003).</p> <p>Perte de diversité spécifique temporaire (de quelques décennies à quelques siècles) du fait que les populations qui vont disparaître d'un lieu donné ne pourront pas être remplacées rapidement par les espèces plus thermophiles.</p> <p>Le Hêtre, <i>Fagus sylvatica</i> a progressé de 300 à 600 m par an vers le Nord (Saltré <i>et al.</i> 2013) à la fin du dernier épisode glaciaire.</p> <p>Une augmentation de 2 degrés en un siècle, correspondant à un déplacement climatique d'environ 300 km vers le Nord, induira un déplacement de sa répartition potentielle de 3 km/an, c'est-à-dire bien au-delà de ses capacités de dispersion. En France, les modèles prévoient une réduction de l'aire du Pin sylvestre alors que le Chêne vert serait lui, favorisé par le changement climatique (Cheaib <i>et al.</i> 2012). Le Hêtre commun, sensible à des conditions plus sèches et chaudes (ONF, 2015) pourrait perdre 36 à 61 % de son territoire d'ici 2100 et des extinctions locales pourraient advenir même au cœur de son aire de répartition (Saltré <i>et al.</i> 2015).</p> <p>Ces espèces valorisées commercialement vont subir des modifications entraînant une modification de la quantité et de la</p>

	<p>localisation des services qu'elles apportent.</p> <p>Un climat plus chaud et plus sec, en provoquant la perte d'espèces clés, affectera les relations entre diversité et productivité des forêts tempérées et donc leur résilience face au changement climatique (Morin <i>et al.</i> 2018). Dans les sites les plus froids, l'augmentation de la température moyenne améliore la productivité forestière mais cette dernière diminue aux latitudes inférieures en raison de la baisse des précipitations (Morin <i>et al.</i> 2018).</p> <p>Les modèles projettent d'importantes réductions des aires de répartition pour les arbres des forêts tempérées de basse altitude en raison du changement climatique (Cheaib <i>et al.</i> 2012), notamment à cause de l'aridification (Ipbes, 2018b).</p>
<p>Impacts pour la société et les secteurs économiques</p>	<p>La repartition et la composition des espèces forestières devraient changer avec l'augmentation des invasions (y compris espèces pathogènes).</p> <p>Déplacement vers le nord de la processionnaire du pin. Cette espèce méditerranéenne est en train de remonter vers le nord de la France à la vitesse de 5,6 km/an en raison d'une augmentation de la probabilité de survie hivernale des larves à la faveur de séries d'hiver doux dans des régions où elles n'arrivaient pas à survivre auparavant. Celle-ci dépend de la température à l'intérieur du nid qui doit être supérieure à 0 °C pendant la nuit et 9 °C pendant le jour pour permettre aux larves de s'alimenter et survivre à l'hiver (Battisti <i>et al.</i> 2005 ; Buffo <i>et al.</i> 2007)</p> <p>Déplacement de la tordeuse du mélèze (Esper <i>et al.</i> 2007)</p> <p>Perte du caractère traditionnel et patrimonial des forêts par remplacement d'espèces</p>
<p>Recommandations pour les changements modérés (2°C)</p>	<p>Augmenter la résilience des forêts en favorisant les mélanges d'espèces, la régénération naturelle ou assistée si nécessaire.</p> <p>Favoriser les peuplements plurispécifiques et à strates irrégulières</p> <p>Diminuer les pressions non liées au changement climatique qui fragilisent les espèces ou aggravent leur réponse au changement climatique. On a montré, chez les plantes au moins, que les espèces les plus strictement liées à la forêt ont des capacités de dispersion très faibles. Des actions pour conserver ces espèces sont nécessaires, sur place dans la limite de leur plasticité écologique et en assurant leur capacité d'évolution et, surtout, pour les aider à se déplacer dans les territoires. Au niveau local, le maintien de couverts continus et fermés, en limitant les changements microclimatiques au sein des peuplements, retardera un temps les effets des changements du macroclimat sur les espèces des sous-bois et du sol. A l'échelle des paysages, le déplacement de certaines espèces peut être favorisé en restaurant la connectivité entre massifs forestiers et, à l'intérieur des massifs, entre microhabitats favorables (Sordello <i>et al.</i> 2014). Il s'agit de mettre en place des trames « vertes », connectant les massifs entre eux, par des zones forestières continues ou, au minimum, des réseaux de haies ou des zones agro-forestières. Il faut assurer la cohérence spatiale des zones de conservation (Natura 2000, réserves, cœurs de parc..., voir figure).</p> <p>En intra-massif, les forestiers mettent en place des trames de vieux bois (îlots de vieillissement et de sénescence, réserves) afin de pallier au manque de stades âgés et de bois morts induit par la sylviculture. Ces trames seront utiles dans le cadre du changement climatique, en particulier s'il y a dynamisation de la sylviculture.</p>

Recommandations pour les changements importants (4°C)	<p>Anticiper basculement vers un écosystème non forestier.</p> <p>Développer une gestion plus « dynamique » des forêts. Cette gestion visant à une diminution de l'indice foliaire (c'est-à-dire la surface foliaire totale projetée au sol) des peuplements afin de réduire la consommation en eau, conduira cependant à une baisse des volumes de bois à l'hectare.</p> <p>Le mélange d'essences est une assurance partielle face au changement climatique, car il accroît les chances qu'une partie du peuplement puisse supporter les conditions futures. Il peut surtout jouer un rôle synergique positif sur certains services écosystémiques. Les observations en situations naturelles ou expérimentales suggèrent que la productivité est plus élevée en mélange que dans les cultures pures. Mais l'ampleur de cet effet, lié surtout à la diminution de la compétition intra-spécifique, dépend fortement de la nature des espèces mises en jeu et est modulé par la fertilité des stations, la sylviculture et les régimes de perturbation. La résistance aux attaques d'insectes ou aux champignons pathogènes peut être accrue en mélange car la colonisation des arbres hôtes est ralentie et parce que la diversité des arbres augmente la probabilité de développement des ennemis naturels des ravageurs et pathogènes (Landmann <i>et al.</i> 2008).</p>
--	---

Type d'écosystème	Arctique et Antarctique
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Diminution de la surface de la banquise, entraînant celle de la biomasse du krill antarctique, et la disparition d'environ 80 % de certaines populations de prédateurs marins</p> <p>Augmentation des eaux libres pouvant créer de nouveaux habitats pour certaines espèces</p> <p>Les prédateurs marins (mammifères et oiseaux) de l'océan austral et antarctique vont connaître pour la grande majorité des impacts négatifs en conséquences des effets du réchauffement climatique sur les habitats de ces régions. Sont déjà observés des années avec de faibles reproductions, des diminutions de populations (50% pour certaines espèces), des problèmes de disponibilité des ressources (Bestley <i>et al.</i> 2020).</p> <p>Augmentation du risque de maladies chez les poissons de ces zones (Desvignes <i>et al.</i> 2022)</p> <p>Les impacts prévus dans ce type d'écosystèmes comprennent des changements dans la distribution spatiale des espèces boréales, un passage d'un zooplancton plus gros et riche en lipides à des proies plus petites et moins nutritives, avec des effets néfastes sur les poissons qui dépendent de proies riches en lipides pour leur survie hivernale, des changements de la faune benthique à pélagique -réseaux trophiques dominés avec des implications pour les niveaux trophiques supérieurs et une survie réduite des coquillages commercialement importants dans les eaux qui sont de plus en plus acides (Mueter <i>et al.</i> 2021).</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	<p>Moindre stockage de carbone dans les sédiments marins</p> <p>L'augmentation des eaux libres pendant l'été dans les mers arctiques et subarctiques entraîne une augmentation de la production primaire et secondaire, la biomasse pourrait augmenter pour certains stocks de poissons commerciaux importants et de nouvelles espèces pourraient être ciblées. En revanche, dans l'océan Austral, le potentiel d'adaptation des espèces existantes est mitigé et le potentiel d'invasion d'espèces de poissons pélagiques de grande taille et très productifs semble faible (McBride <i>et al.</i> 2014).</p>

Impacts pour la société et les secteurs économiques	Les changements prévus devraient entraîner des perturbations dans les pêcheries existantes, l'émergence de nouvelles pêcheries, de nouveaux défis pour la gestion des stocks transfrontaliers et d'éventuels conflits entre les utilisateurs des ressources. Certains impacts peuvent être irréversibles, plus graves ou se produire plus fréquemment en cas de changement climatique anthropique que les impacts associés à la variabilité naturelle, ce qui pose des problèmes de gestion supplémentaires (Mueter <i>et al.</i> 2021).
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	Diminuer la pression de pêche Etablir des aires protégées dans les zones écologiquement pertinentes (voir projet RATTD du Cesab qui propose des zones) et dynamiques afin de pouvoir suivre le déplacement des populations et communautés
Recommandations pour les changements importants (4°C)	Interdire la pêche

Type d'écosystème	Montagne
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Les conséquences des changements de température et de précipitations sont déjà visibles en montagne : recul important des glaciers, diminution du manteau neigeux en moyenne montagne, raréfaction plus fréquente de l'eau des sols et élévation de l'altitude à laquelle se trouve le pergélisol.</p> <p>Les hautes montagnes se réchauffent plus vite que les basses altitudes. Le nombre de jours de gel diminue, les glaciers reculent et la neige persiste pendant des périodes plus courtes, tandis que la pression partielle de CO₂ augmente. Les espèces des altitudes inférieures colonisent les habitats sur les sommets des montagnes à un rythme accéléré, avec des taux cinq fois plus rapides qu'il y a un demi-siècle. Transformation généralisée des assemblages de communautés végétales alpines vers des espèces plus exigeantes en chaleur et/ou moins adaptées au froid. Les espèces végétales de haute altitude ont diminué en abondance et en fréquence. Les espèces végétales fortement adaptées au froid peuvent directement souffrir de saisons de croissance plus chaudes et plus longues en raison de faibles capacités à ajuster les taux de respiration à des conditions plus chaudes. Les effets combinés du réchauffement et de la diminution de la disponibilité de l'eau amplifieront les effets néfastes des contraintes climatiques sur le biote alpin. Cependant, de nombreuses espèces naines et à croissance lente seront affectées lorsque des espèces plus hautes et à croissance plus rapide provenant de basses altitudes envahiront et prospéreront avec le réchauffement des environnements alpins et, par conséquent, menaceront de supplanter les espèces établies localement (Pauli and Halloy 2019).</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	Les conditions de réchauffement encourageront également les changements d'utilisation des terres et le mouvement ascendant de l'agriculture, tandis que la perte de neige est une perte pour les domaines skiables et le tourisme touristique (Pauli and Halloy 2019).

Impacts pour la société et les secteurs économiques	Modification du tourisme (ski, alpinisme), élevage
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	
Recommandations pour les changements importants (4°C)	

Type d'écosystème	Ecosystèmes aquatiques terrestres, zones humides
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Augmentation de la température de l'eau (Daufresne <i>et al.</i> 2004 : augmentation de 1,5 °C sur le Haut-Rhône au niveau du Bugey entre 1979 et 1999).</p> <p>Baisse significative des étiages dont l'occurrence est plus précoce, des débits hivernaux et de début de printemps augmentés. A +1,5 °C, des menaces considérables pèsent sur ces écosystèmes de par le changement de composition et de fonction de ces écosystèmes (Capon <i>et al.</i> 2021). Sur les 31 processus écologiques fondamentaux pour le fonctionnement des écosystèmes d'eau douce, 23 ont déjà été notablement influencés par le changement climatique avec des modifications sur la distribution des espèces, sur la phénologie de ces organismes, la réduction de la taille de certains de ces organismes, avantage d'explosion de populations d'algues ainsi que des interactions découplées entre espèces.</p> <p>Les espèces de libellules des eaux dormantes du sud de l'Europe étendent leur aire de distribution de 115 km par décennie vers le nord (Grewe <i>et al.</i> 2013).</p> <p>Globalement, le changement climatique menace significativement environ la moitié des espèces de poissons de 'eau douce au niveau mondial (Darwall and Freyhof 2015). Il est estimé qu'environ 4 % auront plus de la moitié de leur aire de répartition actuelle exposée à des extrêmes climatiques au-delà de ceux rencontrés historiquement dans un scénario de réchauffement de 1,5 °C, contre 9 % sous 2 °C et 36 % avec un réchauffement de 3,2 °C (Barbarossa <i>et al.</i> 2021). Au niveau européen, sur 1648 espèces d'eau douce évaluées à horizon 2050 et au travers de 3 modèles climatiques, on prévoit que 6 % des espèces communes et 77 % des espèces rares perdront plus de 90 % de leur aire de répartition actuelle. On prévoit que huit espèces de poissons et neuf espèces de mollusques subiront une perte d'aire de répartition de 100 % en raison du changement climatique. En tant que groupe le plus riche en espèces, les mollusques sont particulièrement vulnérables en raison de la forte proportion d'espèces rares et de leur capacité de</p>

	<p>dispersion relativement limitée. De plus, environ 50 % des espèces de mollusques et de poissons n'auront pas de couverture d'aire protégée compte tenu de leurs distributions projetées (Markovic <i>et al.</i> 2014).</p> <p>Dans le bassin du Rhône à hauteur du Bugey, des poissons thermophiles remplacent progressivement en amont les espèces d'eau plus froide; le même type de remplacement est observé chez les invertébrés (Daufresne <i>et al.</i> 2004).</p> <p>Les populations les plus méridionales de beaucoup d'espèces inféodées aux milieux aquatiques vont probablement disparaître ou du moins être très réduites (Markovic <i>et al.</i> 2014). Lors des dernières glaciations, la péninsule ibérique était un refuge où des communautés piscicoles ont persisté et développé des spéciations qui n'ont pu se déplacer vers le nord à la fin des glaciations. Ces espèces endémiques risquent de disparaître ou survivre dans quelques refuges plus froids comme des sources. Le chabot du Lez, fleuve côtier de l'Hérault, en est un exemple.</p> <p>Globalement, 12 %, 27 % et 66 % des lacs passeront à une région thermique de latitude inférieure d'ici 2080-2099 pour les trajectoires de concentration de gaz à effet de serre faibles, moyennes et élevées (Representative Concentration Pathways 2.6, 6.0 et 8.5) respectivement. Dans le pire des cas, une réduction de 79 % du nombre de lacs dans la région thermique la plus septentrionale est prévue (Maberly <i>et al.</i> 2020).</p> <p>Diminution des niveaux d'eau : assèchement, incapacité des espèces végétales en place à tolérer une diminution de l'hydromorphie sur des périodes prolongées : mortalités, diminution de populations</p> <p>Augmentation du niveau marin : salinisation, submersion prolongée : mortalités, diminution de populations</p> <p>Eutrophisation, baisse d'oxygène, colmatage (sédiments) : mortalités, diminution de populations</p> <p>Rupture de continuité (assèchement temporaires longs, bras morts...) : disparition d'habitats</p> <p>Modification des habitats, réduction de populations : favorisation d'espèces exotiques envahissantes</p>
<p>Impacts sur les services écosystémiques associés</p>	<p>Services de régulation : diminution de l'intensité des crues et inondations (zones tampons), réserves d'eau, recharge de la nappe phréatique, épuration des eaux</p> <p>Services support : formation de sol, stockage du carbone et autres cycles</p> <p>Services d'approvisionnement : activités économiques, dont eau potable et pour l'agriculture</p> <p>Services socioculturels : diverses activités récréatives</p> <p>A +1,5 °C, les modifications de compositions des communautés de ces écosystèmes auront des conséquences sur les services écosystémiques (Capon <i>et al.</i> 2021).</p> <p>Les services d'approvisionnement associés à la biodiversité d'eau douce (poissons, fibres, etc.) sont directement menacés par les effets prévus du réchauffement sur la qualité de l'eau et les régimes d'écoulement, en particulier là où les populations écologiques sont déjà menacées par la surexploitation ou d'autres facteurs de stress anthropiques (par exemple, la pollution de l'environnement). La perte d'espèces de poissons d'eau froide d'importance économique (par exemple, les salmonidés) est particulièrement préoccupante dans de nombreuses régions (Maberly <i>et al.</i> 2020). Dans l'ensemble, la sécurité alimentaire est très vulnérable aux changements prévus dans les régimes hydriques, que des conditions plus humides ou plus sèches soient anticipées, même si l'étendue et l'ampleur des risques devraient être considérablement inférieures à 1,5 °C par rapport à 2 °C et un</p>

	<p>réchauffement climatique plus élevé (Betts & McNeall 2018).</p> <p>En plus des impacts économiques et des risques pour les moyens de subsistance humains, le réchauffement climatique menace également les nombreuses valeurs sociales, culturelles et spirituelles que les gens tirent des écosystèmes d'eau douce, y compris l'appréciation esthétique de l'environnement (Auer 2019).</p> <p>Le réchauffement des eaux favorise également des parasites dont l'impact sera accru (Karvonen <i>et al.</i> 2010). Le parasite myxozoaire <i>Tetracapsuloides bryosalmonae</i> provoque la maladie prolifératrice des reins (PKD) qui cause des mortalités chez les salmonidés. En Suisse, Wahli <i>et al.</i> (2008) ont montré qu'il y a une bonne corrélation entre la prévalence de ce parasite et l'altitude ou la température de l'eau. Actuellement le parasite n'est pas présent au-dessus de 800 m, mais il se propagera vers l'amont si les températures augmentent, mettant en péril des populations de truite (Bettge <i>et al.</i> 2009).</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	<p>Risques de diminution de la quantité et de la qualité de la ressource en eau douce pour les différents secteurs dont industrie et agriculture, mais aussi pour la consommation humaine.</p> <p>Aux USA, des travaux projettent qu'en 2100, sous le plus fort scénario d'émission de GES, 50 % des habitats pour les pêcheries d'eaux douces froides devraient disparaître et se limiter aux zones montagneuses, avec l'estimation d'une diminution des jours de pêches de 1,25 millions en 2030, et de 6,42 millions en 2100, entraînant une perte allant de 81 millions \$ jusqu'à 6,4 milliards de 2009 à 2100 (Jones <i>et al.</i> 2012)</p>
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>La bonne qualité écologique des biotopes est un facteur de résilience à mettre en priorité. La restauration de la qualité des masses d'eau continentales prévue par la Directive Cadre sur les Eaux de l'Union Européenne devrait atténuer les impacts des changements climatiques. Comme les aires protégées sont le plus souvent essentiellement terrestres, les réseaux d'aires protégées ne sont pas non plus entièrement appropriés pour la gestion des écosystèmes d'eau douce (par exemple Leal <i>et al.</i> 2020) de sorte qu'il sera important de concevoir ces aires protégées pour les complexités spatiales et temporelles particulières de écosystèmes d'eau douce (Albert <i>et al.</i> 2021).</p> <p>Les priorités régionales pour cette biodiversité visent à:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Protéger les systèmes d'eau douce non modifiés et non réglementés, leurs zones riveraines et leurs bassins versants en tant que refuges d'eau douce ; 2) Gérer activement les régimes d'écoulement dans les systèmes d'eau douce régulés, en donnant la priorité aux principaux attributs nécessaires à la biodiversité et au fonctionnement de l'écosystème ; 3) Revégétaliser les zones riveraines puis les captages en privilégiant les cours supérieurs puis en aval ; 4) Concevoir et mettre en œuvre une gestion flexible et adaptative des infrastructures des ressources en eau ; et 5) Surveiller, évaluer et apprendre des progrès réalisés dans des contextes comparables, en partageant les informations ouvertement et volontairement.
Recommandations pour les	

changements importants (4°C)	
-------------------------------------	--

Type d'écosystème	Cours d'eau et lacs d'altitude
Impacts du cc sur la biodiversité	Augmentation de la production primaire (Massu & Landmann 2011) En Suisse l'écart de température entre les périodes 1978-1987 et 1988-2002 varie de 1,2 °C à zéro depuis les rivières du plateau suisse aux torrents alimentés par les glaciers (Hari <i>et al.</i> 2006)
Impacts sur les services écosystémiques associés	
Impacts pour la société et les secteurs économiques	
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	
Recommandations pour les changements importants (4°C)	

Type d'écosystème	Cours d'eau de plaine et de moyenne montagne
Impacts du cc sur la biodiversité	Diminution de la production primaire (Massu & Landmann 2011)
Impacts sur les services écosystémiques associés	Perte de la ressource en eau douce

Impacts pour la société et les secteurs économiques	
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	Favoriser les arbres de bord de cours d'eau (refroidissement)
Recommandations pour les changements importants (4°C)	

Type d'écosystème	Milieu marin
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>En réponse au réchauffement, la circulation océanique et la stratification des eaux sont modifiées (les eaux se mélangent moins avec les eaux plus profondes, riches en nutriments = appauvrissement) avec des conséquences sur la concentration en oxygène et la productivité primaire (Mora <i>et al.</i> 2013). L'abondance de zooplancton a par exemple été réduite de 70 % entre 1951 et 1993 le long de la côte Californienne (Roemmich & McGowan, 1995).</p> <p>Redistribution spatiale des espèces marines sous changements climatiques récents est déjà largement amorcée pour la plupart des taxons avec un déplacement vers des eaux plus froides (Poloczanska <i>et al.</i> 2013), ce qui peut concentrer les espèces dans des zones plus restreintes et dans de nouvelles zones, augmentant la compétition entre espèces pour les ressources de ces zones (Gomes <i>et al.</i> 2020).</p> <p>Fonctionnement métabolique inadapté (dépenses énergétiques trop importantes pour les capacités cardiaques et respiratoires des poissons, Pörtner & Knust, 2007), avec des conséquences néfastes sur la croissance ou la survie (Neuheimer <i>et al.</i> 2011).</p> <p>Décalages phénologiques dus, en particulier au réchauffement de la mer, par exemple chez de nombreuses espèces planctoniques (Dinoflagellés et Copépodes entre autres) en Mer du Nord (Edwards <i>et al.</i> 2013). Modification des dates de migration ou de reproduction impactant la dynamique temporelle des assemblages et conduire à la désynchronisation des relations prédateurs-proies.</p> <p>Une décroissance de 0,1 unité de pH est déjà observée depuis l'ère industrielle entraînant une plus faible disponibilité du carbonate de calcium nécessaire à la calcification du squelette pour les coraux, coquillages et une partie du zooplancton (Gattuso <i>et al.</i> 2015). L'acclimatation progressive des organismes laisse suggérer un pouvoir adaptatif important, la tolérance aux événements extrêmes semble bien plus réduite (Palumbi <i>et al.</i> 2014).</p>

	<p>La température moyenne annuelle de la surface de l'eau devrait s'élever de 2,8 °C en mer Méditerranée d'ici 2100 selon le scénario médian (ni optimiste ni pessimiste) A2 de l'IPPC. Cette augmentation modifierait la distribution géographique de nombreuses espèces côtières en se basant sur un modèle de niche à 0,1° de résolution spatiale. Ainsi 54 des 256 espèces n'auraient plus de niche climatique favorable et pourraient disparaître avec notamment un fort effet « cul-de-sac » en mer Adriatique qui agirait tout d'abord comme un refuge pour les espèces d'eau froide puis comme une trappe à extinction lors de son réchauffement (Ben Rais Lasram <i>et al.</i> 2010). Au-delà cette perte de diversité taxonomique, la diversité des liens trophiques proie-prédateur diminuerait sur 73,4 % des côtes avec un nombre moyen d'espèces de proies par prédateur qui passerait de 30 actuellement à moins de 26 (Albouy <i>et al.</i> 2014). En effet ce sont les espèces à la base du réseau trophique (par exemple le gobies) qui seraient les plus vulnérables au changement climatique induisant une perte de diversité de proies pour les niveaux trophiques supérieurs (par exemple les mérous). L'impact sur leur productivité reste difficile à prévoir.</p> <p>Pour l'ensemble des espèces de poissons, la vitesse en direction des pôles atteint 72,0 ± 13,5 km en moyenne par décennie. Le déplacement des espèces marines suites au réchauffement des eaux peut ouvrir de nouvelles voies d'invasion d'espèces exotiques (Chan <i>et al.</i> 2018)</p> <p>70 à 90 % des récifs coralliens pourraient être gravement dégradés ou disparaître d'ici 2050 même pour un réchauffement de 1,5 °C au niveau mondial (Guiot & Kramer, 2016)</p> <p>En France métropolitaine, les forêts de laminaires pourraient se déplacer vers le nord avec des extinctions locales d'ici 2041-2050 dans les scénarios 2.6 et 8.5, et avec des pertes de biomasse dues à la raréfaction des surfaces rocheuses sur lesquelles se fixer en allant plus vers le nord, avec la Bretagne comme dernier refuge (Pecquet <i>et al.</i> 2022).</p>
<p>Impacts sur les services écosystémiques associés</p>	<p>Perte de biodiversité, donc des ressources halieutiques à l'équateur et un gain en zone tempérée ou arctique selon les scénarios IPCC-RCP 4.5 (optimiste : stabilisation des émissions) et 8.5 (pessimiste : augmentation des émissions) (Garcia Molinos <i>et al.</i> 2015)</p> <p>La stratification limite la quantité de carbone inorganique fixé lors de la photosynthèse et, ultimement, la fraction de carbone organique exportée par la pompe biologique. Dans les zones de forte productivité (Pérou, Namibie) ainsi que dans certaines zones côtières ou mers intérieures (Baltique, Golfe du Mexique, Mer de Chine orientale), il existe des zones naturellement dépourvues d'oxygène (Diaz & Rosenberg, 2008 ; Rabouille <i>et al.</i> 2008), dont le volume pourrait croître au XXI^e siècle en raison de cette stratification, du réchauffement des eaux de surface, mais aussi de l'activité humaine en zone côtière (eutrophisation). L'impact sur les écosystèmes marins est important car l'oxygène est essentiel au maintien de la plupart des organismes, à l'exception de certaines bactéries.</p> <p>La destruction des puits naturels de carbone diminuerait la capacité du système climatique à absorber le CO₂ alors que son expansion permettrait de fixer davantage de CO₂ en partie anthropique.</p> <p>En 2050 les potentiels globaux de capture augmentent de 30 à 70 % dans les régions de haute latitude et une baisse susceptible d'atteindre 40 % est attendue dans les régions tropicales (Cheung <i>et al.</i> 2009) compromettant la sécurité alimentaire dans de nombreux pays du sud (Lam <i>et al.</i> 2012).</p> <p>L'acidification des océans détruit des écosystèmes marins qui re-larguent leur carbone et augmente aussi la quantité de gaz à effet</p>

	<p>de serre dans l'atmosphère. D'un autre côté, l'augmentation du taux de de CO2 dans l'atmosphère induit également une plus grande production primaire pour certaines espèces.</p> <p>Le réchauffement exacerbe les changements de composition des espèces de plancton, favorise les efflorescences de cyanobactéries et l'eutrophisation, qui à leur tour contribuent aux rétroactions océan/eau douce-atmosphère, en particulier par des changements dans les émissions de sulfure de diméthyle, un composant contribuant notamment à la formation d'aérosols et de production de nuages (Hopkins <i>et al.</i> 2020)</p> <p>Le réchauffement, combiné à la désoxygénation ou à la restriction alimentaire, pourra entraîner des réductions de la taille corporelle moyenne et de l'abondance des poissons et d'autres ectothermes marins d'ici la fin du siècle.</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	<p>Diminution des prises de pêche : moins de poissons et de plus petite taille.</p> <p>En 2050 les potentiels globaux de capture augmenteront de 30 à 70 % dans les régions de haute latitude et une baisse susceptible d'atteindre 40 % est attendue dans les régions tropicales (Cheung <i>et al.</i> 2009) compromettant la sécurité alimentaire dans de nombreux pays du sud (Lam <i>et al.</i> 2012). Diminution de l'efficacité de la pêche, Augmentation du prix des produits de la mer et donc augmentation des difficultés sociales des pêcheurs</p> <p>Agravation du changement climatique en raison de la destruction des écosystèmes puits de carbones ou la disparition des espèces participant au stockage du carbone (exemple des baleines et du phytoplankton (Mahli 2022), plus anecdotique exemple des loutres)</p>
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>Améliorer la résilience des méthodes d'exploitation de la mer, face aux aléas affectant les espèces exploitées</p> <p>Renforcer ou introduire des quotas de pêche pour diminuer cette pression</p> <p>Instaurer des aires marines en protection forte pour servir de zone nourrice</p> <p>Ouvrir à la restauration des écosystèmes puits de carbone qui sont également des points clés pour la biodiversité et les ressources marines, en crustacés, bivalves et poissons.</p> <p>Protéger les habitats et les espèces sensibles (notamment les zones de ponte) et éviter certains engins de pêche destructeurs (tels les chaluts de fonds).</p> <p>Les réserves marines, outil de gestion clé de l'approche écosystémique des pêches, permettent de préserver la capacité de des populations et des écosystèmes à faire face aux contraintes climatiques (d'après Pauly <i>et al.</i> 2002). Dans le cadre du changement des conditions environnementales, il sera aussi nécessaire de réfléchir à la modification de la localisation de ces aires protégées au fur et à mesure du déplacement des espèces (Cashion <i>et al.</i> 2020) Modifications physiologiques dues au stress thermique</p> <p>Augmentation des risques de pullulation de ravageurs (insectes et pathogènes) ou de compétiteurs (adventices, espèces exotiques envahissantes)</p> <p>Adopter une gestion écosystémique des pêches qui tienne compte non seulement des pêcheries mais aussi de l'environnement afin de réduire l'effort de pêche en période environnementale défavorable (confer changement de régime en Namibie).</p>
Recommandations pour les	<p>Restauration ou maintien d'habitats des forêts côtières, des écosystèmes dunaires, des herbiers marins et des prairies littorales pour atténuation des effets d'érosion côtière et de recul du trait de côte.</p>

changements importants (4°C)	<p>Restauration ou maintien des apports sédimentaires naturels pour les écosystèmes côtiers.</p> <p>Restauration de certaines activités « traditionnelles » telles que la saliculture (remise en état de marais salants) ou l'élevage extensif sur les prairies humides (atténuation de la fermeture des milieux) qui favorisent le maintien d'habitat pourvoyeurs de nombreux services écosystémiques</p> <p>Adaptation de certaines activités aux nouvelles contraintes générées par la montée des eaux côtières telle que l'adoption, par les agriculteurs, de plantes plus résistantes à la salinité des sols;</p> <p>Développement de nouvelles activités générant des effets positifs en terme de services écosystémiques permettant d'atténuer certains effets négatifs du réchauffement climatique, telles que l'algoculture (production à faible empreinte énergétique et participant au stockage du carbone). Cette diversité de pratiques pourra par ailleurs être à l'origine d'une mosaïque de socio-écosystèmes offrant de nombreux services écosystémiques récréatifs (observation d'oiseaux migrateurs, écotourisme) et culturels (maintien d'un paysage ouvert « traditionnel » reflétant l'identité de certains territoires).</p> <p>Maintien d'une diversité d'habitat et d'espèces dans l'objectif de favoriser des dynamiques trophiques riches, permettant la régulation de nouvelles espèces invasives ou de nouveaux pathogènes liés au réchauffement climatique (notamment blooms phytoplanctoniques potentiellement toxiques).</p> <p>Développement de l'écoconception dans le domaine des infrastructures physiques côtières (ports en particulier) ou marines (piliers sur lesquels reposent les éoliennes en mer) en vue de créer des habitats propices à différentes phases de cycles de vie d'espèces utiles à l'homme et qui devront s'adapter au changement climatique en cherchant de nouvelles zones de reproduction ou d'alimentation.</p>
-------------------------------------	--

Type d'écosystème	Milieu agricole
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Décalage des échanges « eau contre carbone », vers des stratégies conservatrices (favorisant la survie aux dépens de la croissance) (Tardieu, 2012).</p> <p>Optimisation du rapport « reproduction/production » avec avortement après la floraison qui est un mécanisme adaptatif permettant de produire des grains moins nombreux mais viables en cas de conditions défavorables.</p> <p>Avancement des dates de floraison (par exemple de 0,34 jours par an sur 38 ans chez <i>Boechera stricta</i>, plante de la famille de la moutarde), 80 % de ce glissement étant dû à la plasticité phénotypique (Anderson <i>et al.</i> 2012).</p> <p>Augmentation des risques de pullulation de ravageurs (insectes et pathogènes) ou de compétiteurs (adventices, espèces exotiques envahissantes)</p> <p>Pertes de sols (communautés biologiques, érosion)</p> <p>Modification des communautés prairiales (Peringer <i>et al.</i> 2022)</p>
Impacts sur les services	<p>Perte des fonctions environnementales liées au cycle de l'eau (infiltration, stockage, assainissement et redistribution) et au climat (contrôle des émissions des gaz à effet de serre (GES)) et stockage de carbone dans la matière organique du sol)</p>

écosystémiques associés	<p>Pertes de fertilité des sols Perte de production, quantité et qualité, de biomasse (pour alimentation, matériaux, énergie) Augmentation de la variabilité des rendements des cultures Elevage : perturbation de la croissance, production laitières et œufs, performance reproductive, morbidité et mortalité Avec le réchauffement, il est possible que les espèces régulatrices des ravageurs invertébrés ou rongeurs augmentent dans le nord et le centre de l'Europe, et diminuent dans le sud (Civantos <i>et al.</i> 2012). Toutefois, des changements rapides dans la richesse spécifique pourraient avoir des effets structurels et fonctionnels importants sur les écosystèmes. On peut s'attendre à ce que la réduction de l'abondance des vertébrés et de la richesse en espèces diminue la lutte naturelle contre les ravageurs en agriculture. Des scénarios d'évolution de l'agriculture selon le climat montrent qu'en France, ces scénarios pourraient amener à une extension de l'agriculture aux dépens de la forêt et qui pourraient ainsi avoir un impact négatif sur la réduction d'émission de GES (Lungarska & Chakir 2018)</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	<p>Les choix de variétés et de techniques culturales (dates et densités de semis) les géotypes actuels tendent à devenir inadaptés aux nouveaux contextes climatiques (Brisson <i>et al.</i> 2010 ; Lobell 2014). Agriculture intensive affectée par le changement, l'augmentation des aléas, le dérèglement (imprévisibilité saisonnière, voir 2016) Environ 5 à 8 % de la production alimentaire (en volume) serait perdu chaque année sans les pollinisateurs (Potts <i>et al.</i> 2016). Le changement climatique peut donc affecter l'approvisionnement alimentaire non seulement par l'adéquation des cultures et son impact direct sur les rendements, mais aussi, à travers les réseaux plantes-pollinisateurs. Cette perte a plus effets sur la santé humaine et l'économie, car les cultures dépendantes de la pollinisation ont tendance à être plus nutritives (fruits, noix) et plus rentables (café) (Potts <i>et al.</i> 2016).</p>
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>Réduire les autres pressions anthropiques, notamment interdire les labours et les pesticides Diversification des cultures et des rotations Restaurer habitats semi-naturels (a minima 20 % des surfaces) Stimuler l'activité des sols et la biodiversité qui la soutient repose sur quatre piliers : 1) limiter au maximum le labour qui détruit l'habitat de la faune, 2) apporter des engrais organiques qui fournissent de l'énergie et des nutriments aux organismes du sol, 3) entretenir une couverture permanente du sol afin qu'elle limite le stress thermique et hydrique direct et fournisse une ressource énergétique complémentaire aux organismes du sol, et 4) contrôler les bio-agresseurs par des mécanismes naturels pour éviter l'impact des produits phytosanitaires sur les organismes du sol. Repartir sur des bases génétiques des races et variétés moins inféodées aux intrants à fort impacts, et adaptées aux variations climatiques</p>
Recommandations pour les changements importants (4°C)	<p>Repartir sur des bases génétiques des races et variétés, voire espèces, moins inféodées aux intrants à fort impacts, et adaptées aux variations climatiques Reconception complète des systèmes de culture Adaptation poussée des cultures et animaux d'élevage aux contextes agricoles locaux, plutôt d'adapter les milieu du culture et d'élevage aux races et variétés que l'on cherche à élever et cultiver</p>

Type d'écosystème	Littoraux
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Avec l'augmentation du niveau des océans, les écosystèmes côtiers risquent d'être submergés et de ne pas avoir le temps de suivre l'évolution du trait de côte.</p> <p>D'ici 2041-2050 et pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5, les forêts de kelp pourraient s'éteindre localement dans le sud de la France et perdre en abondance dans le nord, mais avec une perte de biomasse de 62 et 66 % (resp. pour les RCP2.6 et 8.5) (Pecquet <i>et al.</i> 2022)</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	<p>En termes d'atténuation des inondations, les vagues peuvent être considérablement modifiées lorsqu'elles passent au-dessus ou à travers la végétation côtière. La hauteur des vagues peut être réduite de 13 % à 66 % sur 100 m de mangroves (McIvor <i>et al.</i> 2012). Les marais salés ont pu réduire la hauteur des vagues de près de 61 % et l'énergie totale des vagues de 82 % en moyenne (Möller <i>et al.</i> 1999). Les plages, les dunes et les îles-barrières constituées de sable contribuent à dissiper l'énergie des vagues et fournissent d'importantes réserves de sédiments qui peuvent favoriser le maintien des littoraux et même une certaine adaptation à l'élévation du niveau de la mer (Defeo <i>et al.</i> 2009).</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	<p>Au Mexique, la perte économique annuelle causée par la disparition des services écosystémiques côtiers est estimée à 6,5 milliards \$ (Fernandez-Diaz <i>et al.</i> 2022). En Europe, on estime qu'en 2018, la zone côtière (hors haute mer) comprenait 579 700 km² d'habitats générant 494 milliards d'euros de services annuels. La future élévation du niveau de la mer pourrait éroder 1,0 % [intervalle de confiance à 90 % 0,7–1,5 %] de la zone de 2018 sous RCP4.5 et 1,2 % [0,7–2,2 %] sous RCP8.5. La baisse des services serait encore plus importante : 4,2 % [3,0–6,1 %] sous RCP4.5, et 5,1 % [3,3–8,5 %] sous RCP8.5. Les pertes absolues les plus élevées seraient subies par les marais salés, tandis que les pertes relatives seraient les plus élevées sur les plages, les sables et les dunes. Les pays les plus touchés en termes économiques relatifs seraient le Danemark, l'Albanie, la Grèce, l'Estonie et la Finlande, mais des pays comme l'Allemagne, les Pays-Bas et la France seraient parmi ceux qui perdraient la plus grande part de leurs services écosystémiques côtiers (Paprotny <i>et al.</i> 2021).</p> <p>Pour la France, ces travaux prévoient une diminution annuelle, de 2018 à 2050, de 3 % sous les RCP4.5 et RCP8.5, et de 2018 à 2100, de 6,5 % sous le RCP4.5 et 7,5 % sous le RCP8.5</p> <p>En France, les forêts de kelp fournissent de nombreux services écosystémiques qui devraient diminuer d'ici 2041-2050, et plus encore dans le scénario RCP8.5, exceptés la séquestration du carbone et l'oxygénation de l'eau, qui ont tous deux la baisse prévue la plus faible (24,53 % et 43,85 % dans le scénario RCP8.5 et RCP2.6, respectivement). La plus forte diminution de service concerne la protection du littoral urbanisé par le kelp (S62) (98 % et 86 % sous RCP8.5 et RCP2.6, respectivement). Les quantités potentielles d'algues extraites et d'acide alginique extradiées ont toutes deux diminué de 70 % sous RCP2.6 et de 91 % sous RCP8.5. Les quantités potentielles de N et de P recyclées ont toutes deux diminué de 61 % sous RCP2.6 et de 66 % sous RCP8.5 (Pecquet <i>et al.</i> 2022).</p>

Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>Restauration ou maintien d'habitats des zones humides côtières, des récifs coralliens, des marais salants, des habitats dunaires et des forêts de mangroves jouant le rôle de tampon sur les zones côtières par réduction des impacts d'évènements extrêmes tels que les tsunamis et atténuation des effets de submersions liés à l'élévation du niveau de la mer et aux phénomènes de houles de grandes ampleurs</p> <p>Importance d'adapter les mesures de conservation aux sites envisagés car même proches, deux sites peuvent être affectés différemment par des enjeux climatiques (Barausse <i>et al.</i> 2022)</p> <p>Il convient, pour conserver les capacités d'adaptation, d'actualiser le quota de récolte actuellement pratiqué (soit 20 % de la biomasse totale de kelp en France, Bajjouk <i>et al.</i> (2015)) et d'allouer l'effort de récolte de manière à intégrer explicitement l'influence des changements climatiques en fonction des futures aires de distribution et de la biomasse (Pecquet <i>et al.</i> 2022). De plus ; en intégrant explicitement les forêts de kelp comme habitat vulnérable dans la directive européenne Habitats (au lieu de les considérer comme de simples composants des habitats « récifaux » (Airoldi and Beck 2007 ; Teagle <i>et al.</i> 2017)), elles pourraient bénéficier en priorité de mesures de conservation. Les mesures de conservation comprennent le contrôle de la récolte et la conception d'aires marines protégées qui tiennent compte des aires de distribution actuelles et futures du kelp (Pecquet <i>et al.</i> 2022).</p>
Recommandations pour les changements importants (4°C)	<p>Organiser le déplacement des agglomérations (voir Mississippi, Bangladesh, Indonésie...)</p>

Type d'écosystème	Outre-Mer tropicale
Impacts du cc sur la biodiversité	<p>Les mangroves subissent les effets cumulés du développement de la crevetticulture, de l'urbanisation et du prélèvement de bois. Elle est aussi au premier rang des écosystèmes potentiellement perturbés par le changement climatique, concernée par l'élévation du niveau marin mais aussi par l'augmentation des températures ou l'irrégularité des précipitations. Depuis les années 1970, sur la côte Pacifique mexicaine, il y a un recul significatif de la mangrove sur sa frange littorale alors qu'elle progresse vers l'intérieur des terres, cette translation adaptative de l'écosystème étant attribuée à l'élévation du niveau marin (Lopez-Medellin <i>et al.</i> 2011). Dans la région des Sunderbans, où la plus grande mangrove du monde recule sous l'effet conjugué de la subsidence et de l'élévation du niveau océanique (Alongi, 2015). Réponses variées de la mangrove selon les régions (Record <i>et al.</i> 2013).</p> <p>Une diminution des précipitations, associée à une évaporation intense, conduirait alors à une augmentation de la salinité du substrat des mangroves, à une baisse de sa productivité, voire à son recul dans les zones concernées. Ces processus ont été constatés au nord de l'Australie (Gilman <i>et al.</i> 2008), et récemment c'est près de 10 000 hectares de mangrove qui ont dépéri dans ce pays, cette mortalité massive étant liée à une diminution drastique des précipitations des années précédentes (Duke, 2017). De même, les mangroves aux limites les plus arides de leur aire (Golfe Persique, Mer Rouge), constituées de peuplements</p>

	<p>peu denses et arbustifs, sont aujourd’hui fortement menacées par la raréfaction des pluies, mais aussi par l’augmentation des températures et l’élévation du niveau marin.</p> <p>La mangrove de Guyane a une dynamique très active liée aux variations océano-climatiques de l’Atlantique Nord. C’est l’une des mangroves les mieux préservées de la planète, non exploitée pour ses ressources ni altérée par les activités humaines. Elle est soumise à une dynamique très active d’extension et de retrait cyclique, en lien direct avec les vagues océaniques, elle-même générées par les alizés et sous le contrôle de l’Oscillation Nord Atlantique (NAO). Les alizés génèrent des vagues plus fortes lorsque l’indice NAO est positif ou au contraire plus faibles quand celui-ci est négatif, et cela notamment le long du littoral guyanais. Certains modèles suggèrent une plus grande fréquence de ses phases positives, et donc pour la mangrove guyanaise des phases de recul plus intenses aggravées par l’élévation du niveau de la mer.</p>
Impacts sur les services écosystémiques associés	<p>(Ces processus ont été documentés aussi bien aux limites nord de l’aire des mangroves (Louisiane : Osland <i>et al.</i> 2017; Floride : Rodriguez <i>et al.</i> 2016), qu’à ses limites sud (Nouvelle Zélande ou Afrique du Sud, Saintilan <i>et al.</i> 2014).</p> <p>Risque de perte des services associées aux mangroves : protection des côtes face aux événements extrêmes, de nourricerie et nurserie pour de nombreuses espèces marines, rétention de polluants et de sédiments (Lee <i>et al.</i> 2014), fonction de puits de carbone (Alongi, 2012).</p> <p>La déforestation tropicale aggrave le changement climatique, elle contribue à 10% des GES.</p> <p>Les forêts tropicales fournissent des produits diversifiés aux communautés locales et constituent d’importants filets de sécurité, par exemple lorsque la production agricole est affectée par une sécheresse. Les arbres situés dans les parcelles agroforestières peuvent contribuer au maintien de la production sous un climat variable et à la protection des cultures contre les événements climatiques extrêmes. Les forêts tropicales contribuent à réguler le débit de base durant les saisons sèches et le débit maximal durant les événements pluvieux, ce qui est crucial pour l’adaptation dans les bassins versants en aval (Pramova <i>et al.</i> 2012).</p>
Impacts pour la société et les secteurs économiques	
Recommandations pour les changements modérés (2°C)	<p>Pour permettre la migration de la mangrove vers l’intérieur des terres vérifier que l’espace est disponible et qu’aucun édifice humain (urbanisation, digues) ne l’en empêche</p> <p>Limiter l’aménagement du littoral guyanais, en préservant notamment les savanes situées au contact de la mangrove, pour permettre à cet écosystème de s’y replier et de s’adapter au changement climatique.</p> <p>Réduire les pressions anthropiques sur les forêts tropicales (par exemple la dégradation ou la fragmentation) est donc nécessaire pour favoriser les mécanismes écologiques d’adaptation.</p>
Recommandations pour les	Réintroduire de la diversité spécifique (limitante en milieu insulaire)

changements importants (4°C)	
---	--

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adhikari, P., Lee, Y. H., Adhikari, P., Hong, S. H., & Park, Y.-S. (2022). Climate change-induced invasion risk of ecosystem disturbing alien plant species : An evaluation using species distribution modeling. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2022.880987>
- Airoldi, L., & Beck, M. W. (2007). Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. <https://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=111481&printversion=1&dropIMIStitle=1>
- Albert, C. H., Cabrera, C., Marty, E., & Verdier, L. (2021). Caractérisation des communautés d'oiseaux et de chauves-souris dans les parcs urbains d'Aix-en-Provence. *Ecologia mediterranea*, 47(1), 17.
- Albouy, C., Velez, L., Coll, M., Colloca, F., Le Loc'h, F., Mouillot, D., & Gravel, D. (2014). From projected species distribution to food-web structure under climate change. *Global Change Biology*, 20(3), 730-741. <https://doi.org/10.1111/gcb.12467>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313-322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2015). The Impact of Climate Change on Mangrove Forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30-39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Alsos, I. G., Ehrich, D., Thuiller, W., Eidesen, P. B., Tribsch, A., Schönswetter, P., Lagaye, C., Taberlet, P., & Brochmann, C. (2012). Genetic consequences of climate change for northern plants. *Proceedings. Biological Sciences*, 279(1735), 2042-2051. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2363>
- Anderson, J. T., Inouye, D. W., McKinney, A. M., Colautti, R. I., & Mitchell-Olds, T. (2012). Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1743), 3843-3852. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1051>
- Araújo, M. B., & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1677-1688. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>
- Arneth, (s. d.). *Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change | PNAS*. Consulté 19 juillet 2023, à l'adresse <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2009584117>
- Attorre, F., Alfò, M., De Sanctis, M., Francesconi, F., Valenti, R., Vitale, M., & Bruno, F. (2011). Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Applied Vegetation Science*, 14(2), 242-255. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01114.x>
- Auer, M. R. (2019). Environmental Aesthetics in the Age of Climate Change. *Sustainability*, 11(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su11185001>
- Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A.-L., & Dubuisson, B. (2017). Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa751c>
- Bajjouk, T., Rochette, S., Laurans, M., Ehrhold, A., Hamdi, A., & Le Niliot, P. (2015). Multi-approach mapping to help spatial planning and management of the kelp species *L. digitata* and *L. hyperborea* : Case study of the Molène Archipelago, Brittany. *Journal of Sea Research*, 100, 2-21. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.04.004>

- Barausse, A., Meulenbergh, C., Occhipinti, I., Abordi, M., Endrizzi, L., Guadagnin, G., Piron, M., *et al.* (2022). A Methodological Proposal for the Climate Change Risk Assessment of Coastal Habitats Based on the Evaluation of Ecosystem Services: Lessons Learnt from the INTERREG Project ECO-SMART. *Sustainability*, 14(13), 7567. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su14137567>
- Barbarossa, V., Bosmans, J., Wanders, N., King, H., Bierkens, M. F. P., Huijbregts, M. A. J., & Schipper, A. M. (2021). Threats of global warming to the world's freshwater fishes. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21655-w>
- Barbet-Massin, M., Thuiller, W., & Jiguet, F. (2012). The fate of European breeding birds under climate, land-use and dispersal scenarios. *Global Change Biology*, 18(3), 881-890. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02552.x>
- Barnard, P. L., Dugan, J. E., Page, H. M., Wood, N. J., Hart, J. A. F., Cayan, D. R., Erikson, L. H., Hubbard, D. M., Myers, M. R., Melack, J. M., & Iacobellis, S. F. (2021). Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94942-7>
- Barton, B. T., Beckerman, A. P., & Schmitz, O. J. (2009). Climate warming strengthens indirect interactions in an old-field food web. *Ecology*, 90(9), 2346-2351. <https://doi.org/10.1890/08-2254.1>
- Barton, B. T., & Schmitz, O. J. (2009). Experimental warming transforms multiple predator effects in a grassland food web. *Ecology Letters*, 12(12), 1317-1325. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01386.x>
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005). Expansion of Geographic Range in the Pine Processionary Moth Caused by Increased Winter Temperatures. *Ecological Applications*, 15(6), 2084-2096. <https://doi.org/10.1890/04-1903>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Bellard, C., Jeschke, J. M., Leroy, B., & Mace, G. M. (2018). Insights from modeling studies on how climate change affects invasive alien species geography. *Ecology and Evolution*, 8(11), 5688-5700. <https://doi.org/10.1002/ece3.4098>
- Belle, E. M. S., Burgess, N. D., Misrachi, M., Arnell, A., Masumbuko, B., Somda, J., Hartley A., Jones, R., Janes T., McSweeney C., Mathison C., Buontempo C., Butchart S., Willis S. G., Baker D. J., Carr J., Hughes, A., Foden W., Smith R. J., Smith J., Stolton S., Dudley N., Hockings M., Mulongoy J., & Kingston, N. (2016). Climate change impacts on biodiversity and protected areas in West Africa, summary of the main outputs of the parcc project, protected areas resilient to climate change in West Africa. Cambridge, UK: UNEP-WCMC. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002534.pdf>
- Ben Rais Lasram, F., Guilhaumon, F., Albouy, C., Somot, S., Thuiller, W., & Mouillot, D. (2010). The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change. *Global Change Biology*, 16(12), 3233-3245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02224.x>
- Benavides, R., Escudero, A., Coll, L., Ferrandis, P., Gouriveau, F., Hódar, J. A., Ogaya, R., Rabasa, S. G., Granda, E., Santamaría, B. P., Martínez-Vilalta, J., Zamora, R., Espelta, J. M., Peñuelas, J., & Valladares, F. (2015). Survival vs. Growth trade-off in early recruitment challenges global warming impacts on Mediterranean mountain trees. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17(5), 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2015.06.004>

- Benítez-Benítez, C., Sanz-Arnal, M., Urbani, M., Jiménez-Mejías, P., & Martín-Bravo, S. (2022). Dramatic impact of future climate change on the genetic diversity and distribution of ecologically relevant Western Mediterranean *Carex* (Cyperaceae). *PeerJ*, *10*, e13464. <https://doi.org/10.7717/peerj.13464>
- Bestley, S., Ropert-Coudert, Y., Bengtson Nash, S., Brooks, C. M., Cotté, C., Dewar, M., Friedlaender, A. S., Jackson, J. A., Labrousse, S., Lowther, A. D., McMahon, C. R., Phillips, R. A., Pistorius, P., Puskic, P. S., Reis, A. O. de A., Reisinger, R. R., Santos, M., Tarszisz, E., Tixier, P., ... Wienecke, B. (2020). Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean: Birds and Marine Mammals in a Changing Climate. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *8*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2020.566936>
- Bettge, K., Segner, H., Burki, R., Schmidt-Posthaus, H., & Wahli, T. (2009). Proliferative kidney disease (PKD) of rainbow trout: Temperature- and time-related changes of *Tetracapsuloides bryosalmonae* DNA in the kidney. *Parasitology*, *136*(6), 615-625. <https://doi.org/10.1017/S0031182009005800>
- Betts, R. A., & McNeall, D. (2018). How much CO₂ at 1.5 °C and 2 °C? *Nature Climate Change*, *8*(7), 546-548. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0199-5>
- Blicharska, M., Smithers, R. J., Mikusiński, G., Rönnbäck, P., Harrison, P. A., Nilsson, M., & Sutherland, W. J. (2019). Biodiversity's contributions to sustainable development. *Nature Sustainability*, *2*(12), Article 12. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0417-9>
- Blowes, S. A., Supp, S. R., Antão, L. H., Bates, A., Bruelheide, H., Chase, J. M., Moyes, F., Magurran, A., McGill, B., Myers-Smith, I. H., Winter, M., Bjorkman, A. D., Bowler, D. E., Byrnes, J. E. K., Gonzalez, A., Hines, J., Isbell, F., Jones, H. P., Navarro, L. M., ... Dornelas, M. (2019). The geography of biodiversity change in marine and terrestrial assemblages. *Science (New York, N.Y.)*, *366*(6463), 339-345. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1620>
- Bonan, G.B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320,1444-1449(2008).DOI:10.1126/science.1155121
- Boone, R. B., Conant, R. T., Sircely, J., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2018). Climate change impacts on selected global rangeland ecosystem services. *Global Change Biology*, *24*(3), 1382-1393. <https://doi.org/10.1111/gcb.13995>
- Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Doney, S. C., Dunne, J. P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Séférian, R., Tjiputra, J., & Vichi, M. (2013). Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: Projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, *10*(10), 6225-6245. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>
- Bouchet, V., Bourcet, C., Cécillon, E., & Lavaud, S. (2021). *Évaluations économiques des services rendus par la biodiversité*
- Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A., & Weber, T. (2019). Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, *568*(7752), Article 7752. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2>
- Brisson, N. N., Gate, P. P., Gouache, D. D., Charmet, G., Oury, F.-X. F.-X., & Huard, F. F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, *119*(1), 201-202. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., & Larsson, S. (2007). Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, *9*(1), 65-72. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00321.x>

- Butchart, S. H. M., Di Marco, M., & Watson, J. E. M. (2016). Formulating Smart Commitments on Biodiversity: Lessons from the Aichi Targets. *Conservation Letters*, *9*(6), 457-468. <https://doi.org/10.1111/conl.12278>
- Caillon, R., Suppo, C., Casas, J., Arthur Woods, H., & Pincebourde, S. (2014). Warming decreases thermal heterogeneity of leaf surfaces: Implications for behavioural thermoregulation by arthropods. *Functional Ecology*, *28*(6), 1449-1458. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12288>
- Capon, S. J., Stewart-Koster, B., & Bunn, S. E. (2021). Future of Freshwater Ecosystems in a 1.5°C Warmer World. *Frontiers in Environmental Science*, *9*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.784642>
- Carvalho, S. B., Brito, J. C., Crespo, E. J., & Possingham, H. P. (2010). From climate change predictions to actions – conserving vulnerable animal groups in hotspots at a regional scale. *Global Change Biology*, *16*(12), 3257-3270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02212.x>
- Casazza, G., Giordani, P., Benesperi, R., Foggi, B., Viciani, D., Filigheddu, R., Farris, E., Bagella, S., Pisanu, S., & Mariotti, M. G. (2014). Climate change hastens the urgency of conservation for range-restricted plant species in the central-northern Mediterranean region. *Biological Conservation*, *179*, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.09.015>
- Cashion, T., Nguyen, T., Brink, T. ten, Mook, A., Palacios-Abrantes, J., & Roberts, S. M. (2020). Shifting seas, shifting boundaries: Dynamic marine protected area designs for a changing climate. *PLOS ONE*, *15*(11), e0241771. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241771>
- Castaño, C., Alday, J. G., Lindahl, B. D., Martínez de Aragón, J., de-Miguel, S., Colinas, C., Parladé, J., Pera, J., & Bonet, J. A. (2018). Lack of thinning effects over inter-annual changes in soil fungal community and diversity in a Mediterranean pine forest. *Forest Ecology and Management*, *424*, 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.004>
- Cavan, E. L., & Hill, S. L. (2022). Commercial fishery disturbance of the global ocean biological carbon sink. *Global Change Biology*, *28*(4), 1212-1221. <https://doi.org/10.1111/gcb.16019>
- Chan, F. T., Stanislawczyk, K., Sneekes, A. C., Dvoretzky, A., Gollasch, S., Minchin, D., David, M., Jelmert, A., Albrechtsen, J., & Bailey, S. A. (2019). Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Global Change Biology*, *25*(1), 25-38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>
- Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., Hooper, D. U., Lavorel, S., Sala, O. E., Hobbie, S. E., Mack, M. C., & Díaz, S. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature*, *405*(6783), Article 6783. <https://doi.org/10.1038/35012241>
- Charmantier, A., McCleery, R. H., Cole, L. R., Perrins, C., Kruuk, L. E. B., & Sheldon, B. C. (2008). Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science (New York, N.Y.)*, *320*(5877), 800-803. <https://doi.org/10.1126/science.1157174>
- Chebib, A., Badeau, V., Boe, J., Chuine, I., Delire, C., Dufrêne, E., François, C., Gritti, E. S., Legay, M., Pagé, C., Thuiller, W., Viovy, N., & Leadley, P. (2012). Climate change impacts on tree ranges: Model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, *15*(6), 533-544. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01764.x>

Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., & Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, *10*(3), 235-251. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00315.x>

Chevin, L.-M., & Lande, R. (2010). When do adaptive plasticity and genetic evolution prevent extinction of a density-regulated population? *Evolution; International Journal of Organic Evolution*, *64*(4), 1143-1150. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2009.00875.x>

CGDD (2019). Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde. SDES/Datalab, Edition 2019. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-46-chiffres-cles-du-climat-edition-2019-novembre2018.pdf>

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., & Peters, W. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465-570). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>

Civantos, E., Thuiller, W., Maiorano, L., Guisan, A., & Araújo, M. B. (2012). Potential Impacts of Climate Change on Ecosystem Services in Europe: The Case of Pest Control by Vertebrates. *BioScience*, *62*(7), 658-666. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.7.8>

Clavel, J., Julliard, R., & Devictor, V. (2011). Worldwide decline of specialist species: Toward a global functional homogenization? *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(4), 222-228. <https://doi.org/10.1890/080216>

Condés, S., & García-Robredo, F. (2012). An empirical mixed model to quantify climate influence on the growth of *Pinus halepensis* Mill. Stands in South-Eastern Spain. *Forest Ecology and Management*, *284*, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.030>

Fuso Nerini, F., Sovacool, B., Hughes, N., Cozzi, L., Cisgrave, E., Howells, M., Tavoni, M., Tomei, J., Zerriffi, H., & Milligan, B. (2019). Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. *Nat Sustain* *2*, 674–680 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0334-y>

Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo, J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadygrov, N., Iles, C., Corre, L., Sandstad, M., Somot, S., Nabat, P., Vautard, R., Levavasseur, G., Schwingshackl, C., Sillmann, J., Kjellström, E., Nikulin, G., Aalbers, E., Lenderink, G., ... Wulfmeyer, V. (2021). Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(4), e2019JD032356. <https://doi.org/10.1029/2019JD032356>

Corner, A., & Pidgeon, N. (2014). Geoengineering, climate change scepticism and the 'moral hazard' argument: An experimental study of UK public perceptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *372*(2031), 20140063. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0063>

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, *26*, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

Couto Torres, J., SB, C., Tarroso, P., Velo-Antón, G., Carranza, S., & Moritz, C. (2016, février 10). *Climate Change Effects on the Cryptic Diversity of Amphibians and Reptiles in the Iberian Peninsula*.

- Cushing, D. H. (1990). Plankton Production and Year-class Strength in Fish Populations : An Update of the Match/Mismatch Hypothesis. In J. H. S. Blaxter & A. J. Southward (Éds.), *Advances in Marine Biology* (Vol. 26, p. 249-293). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60202-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60202-3)
- Dale, V. H., Tharp, M. L., Lannom, K. O., & Hodges, D. G. (2010). Modeling transient response of forests to climate change. *Science of The Total Environment*, 408(8), 1888-1901. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.050>
- Damien, M., & Tougeron, K. (2019). Prey–predator phenological mismatch under climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.002>
- Darwall, W. R. T., & Freyhof, J. (2015). Lost fishes, who is counting? The extent of the threat to freshwater fish biodiversity. In G. P. Closs, J. D. Olden, & M. Krkosek (Éds.), *Conservation of Freshwater Fishes* (p. 1-36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139627085.002>
- Daufresne, M., Roger, M. C., Capra, H., & Lamouroux, N. (2004). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River : Effects of climatic factors. *Global Change Biology*, 10(1), 124-140. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.00720.x>
- Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D. S., Schlacher, T. A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M., & Scapini, F. (2009). Threats to sandy beach ecosystems : A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>
- de Oliveira Roque, F., Menezes, J. F. S., Northfield, T., Ochoa-Quintero, J. M., Campbell, M. J., & Laurance, W. F. (2018). Warning signals of biodiversity collapse across gradients of tropical forest loss. *Scientific Reports*, 8(1), 1622. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19985-9>
- Desvignes, T., Lauridsen, H., Valdivieso, A., Fontenele, R. S., Kraberger, S., Murray, K. N., François, N. R. L., Detrich, H. W., Kent, M. L., Varsani, A., & Postlethwait, J. H. (2022). A parasite outbreak in notothenioid fish in an Antarctic fjord. *IScience*, 25(7). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104588>
- Devictor, V., van Swaay, C., Brereton, T., Brotons, L., Chamberlain, D., Heliölä, J., Herrando, S., Julliard, R., Kuussaari, M., Lindström, Å., Reif, J., Roy, D. B., Schweiger, O., Settele, J., Stefanescu, C., Van Strien, A., Van Turnhout, C., Vermouzek, Z., WallisDeVries, M., ... Jiguet, F. (2012). Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/nclimate1347>
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, 321(5891), 926-929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., ... Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science (New York, N.Y.)*, 366(6471), eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Directorate-General for Environment (European Commission), Tsiripidis, I., Piernik, A., Janssen, J. A. M., Tahvanainen, T., Molina, J. A., Giusso del Galdo, G., Gardfjell, H., Dimopoulos, P., Šumberová, K., Acosta, A., Biurrun, I., Poulin, B., Hájek, M., Bioret, F., Essl, F., Rodwell, J. R., García Criado, M., Schaminée, J. H. J., ... Gigante, D. (2016). *European red list of habitats. Part 2, Terrestrial and freshwater habitats*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/091372>
- Doblas-Miranda, E., Alonso, R., Arnan, X., Bermejo, V., Brotons, L., de las Heras, J., Estiarte, M., Hódar, J. A., Llorens, P., Lloret, F., López-Serrano, F. R., Martínez-Vilalta, J., Moya, D., Peñuelas, J., Pino, J., Rodrigo, A.,

- Roura-Pascual, N., Valladares, F., Vilà, M., ... Retana, J. (2017). A review of the combination among global change factors in forests, shrublands and pastures of the Mediterranean Region : Beyond drought effects. *Global and Planetary Change*, 148, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.012>
- Doblas-Miranda, E., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Álvarez, A., Ávila, A., Bonet, F. J., Brotons, L., Castro, J., Curiel Yuste, J., Díaz, M., Ferrandis, P., García-Hurtado, E., Iriondo, J. M., Keenan, T. F., Latron, J., Llusà, J., Loepfe, L., Mayol, M., Moré, G., ... Retana, J. (2015). Reassessing global change research priorities in mediterranean terrestrial ecosystems : How far have we come and where do we go from here? *Global Ecology and Biogeography*, 24(1), 25-43. <https://doi.org/10.1111/geb.12224>
- Donatti, C.I., Harvey, C.A., Hole, D., Panfil, S.N. & Schurman, H. (2020). Indicators to measure the climate change adaptation outcomes of ecosystem-based adaptation. *Climatic Change* 158, 413–433 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02565-9>
- Droulia, F., & Charalampopoulos, I. (2022). A Review on the Observed Climate Change in Europe and Its Impacts on Viticulture. *Atmosphere*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/atmos13050837>
- Duane, A., Aquilué, N., Canelles, Q., Morán-Ordoñez, A., De Cáceres, M., & Brotons, L. (2019). Adapting prescribed burns to future climate change in Mediterranean landscapes. *Science of The Total Environment*, 677, 68-83. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.348>
- Duke, N. C., Kovacs, J. M., Griffiths, A. D., Preece, L., Hill, D. J. E., Oosterzee, P. van, Mackenzie, J., Morning, H. S., Burrows, D., Duke, N. C., Kovacs, J. M., Griffiths, A. D., Preece, L., Hill, D. J. E., Oosterzee, P. van, Mackenzie, J., Morning, H. S., & Burrows, D. (2017). Large-scale dieback of mangroves in Australia's Gulf of Carpentaria : A severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. *Marine and Freshwater Research*, 68(10), 1816-1829. <https://doi.org/10.1071/MF16322>
- Durant, J. M., Hjermand, D. Ø., Ottersen, G., & Stenseth, N. C. (2007). Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *Climate Research*, 33(3), 271-283. <https://doi.org/10.3354/cr033271>
- Edwards, M., Bresnan, E., Cook, K., Heath, M., Helanaouet, P., Lynam, C., Raine, R., & Widdicombe, C. (2013). Impacts of climate change on plankton [Pdf]. *MCCIP Science Review 2013*, 15 pages. <https://doi.org/10.14465/2013.ARC12.098-112>
- EFESE. (2018). Les écosystèmes forestiers français.
- EFESE. (2020). Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques : Du constat à l'action. La documentation Française. https://medias.vie-publique.fr/data_storage_s3/rapport/pdf/279531.pdf
- Esper, J., Büntgen, U., Frank, D. C., Nievergelt, D., & Liebhold, A. (2006). 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1610), 671-679. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.0191>
- Fabricius, K. E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllhner, N., Glas, M. S., & Lough, J. M. (2011). Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1(3), Article 3. <https://doi.org/10.1038/nclimate1122>
- Fernández-Díaz, V. Z., Canul Turriza, R. A., Kuc Castilla, A., & Hinojosa-Huerta, O. (2022). Loss of coastal ecosystem services in Mexico : An approach to economic valuation in the face of sea level rise. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.898904>

- Fey, S. B., Siepielski, A. M., Nusslé, S., Cervantes-Yoshida, K., Hwan, J. L., Huber, E. R., Fey, M. J., Catenazzi, A., & Carlson, S. M. (2015). Recent shifts in the occurrence, cause, and magnitude of animal mass mortality events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(4), 1083–1088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414894112>
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2004). Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 557–581. <http://www.jstor.org/stable/30034127>
- FOREST EUROPE, 2015: State of Europe's Forests 2015 https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2022/02/soef_21_12_2015.pdf
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. de O., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Dominguez, M. del M. Z., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- García Molinos, J., Halpern, B. S., Schoeman, D. S., Brown, C. J., Kiessling, W., Moore, P. J., Pandolfi, J. M., Poloczanska, E. S., Richardson, A. J., & Burrows, M. T. (2016). Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. *Nature Climate Change*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/nclimate2769>
- Gattuso, J.-P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Pörtner, H.-O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., ... Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349(6243), aac4722. <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>
- Gauquelin, T., Michon, G., Joffre, R., Duponnois, R., Génin, D., Fady, B., Bou Dagher-Kharrat, M., Derridj, A., Slimani, S., Badri, W., Alifriqui, M., Auclair, L., Simenel, R., Aderghal, M., Baudoin, E., Galiana, A., Prin, Y., Sanguin, H., Fernandez, C., & Baldy, V. (2018). Mediterranean forests, land use and climate change: A social-ecological perspective. *Regional Environmental Change*, 18(3), 623-636. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0994-3>
- Gaüzère, P., O'connor, L., Botella, C., Poggiato, G., Münkemüller, T., Pollock, L., Brose, U., Maiorano, L., Harfoot, M., & Thuiller, W. (2022). The diversity of biotic interactions complements functional and phylogenetic facets of biodiversity. *Current Biology - CB*, 32(9), 2093-2100.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.009>
- Genner, M. J., Freer, J. & Rutterford, A.L. (2017). *Future of the Sea: Biological Responses to Ocean Warming*. London: Foresight, Government Office for Science.
- Gervais, C. R., Huveneers, C., Rummer, J. L., & Brown, C. (2021). Population variation in the thermal response to climate change reveals differing sensitivity in a benthic shark. *Global Change Biology*, 27(1), 108-120. <https://doi.org/10.1111/gcb.15422>
- Gienapp, P., van Noordwijk, A. J., & Visser, M. E. (2013). Genetic background, and not ontogenetic effects, affects avian seasonal timing of reproduction. *Journal of Evolutionary Biology*, 26(10), 2147-2153. <https://doi.org/10.1111/jeb.12205>
- Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., & Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.009>

- Gomes, H., Kersulec, C., Doyen, L., Blanchard, F., Cisse, A., & Sanz, N. (2020). Climate warming vs ecological competition for marine tropical biodiversity and fisheries. *Bordeaux Economics Working Papers*, Article 2020-13. <https://ideas.repec.org/p/grt/bdxewp/2020-13.html>
- González-Braojos, S., Sanz, J. J., & Moreno, J. (2017). Decline of a montane Mediterranean pied flycatcher *Ficedula hypoleuca* population in relation to climate. *Journal of Avian Biology*, *48*(11), 1383-1393. <https://doi.org/10.1111/jav.01405>
- Grewe, Y., Hof, C., Dehling, D. M., Brandl, R., & Brändle, M. (2013a). Recent range shifts of European dragonflies provide support for an inverse relationship between habitat predictability and dispersal. *Global Ecology and Biogeography*, *22*(4), 403-409. <https://doi.org/10.1111/geb.12004>
- Grewe, Y., Hof, C., Dehling, D. M., Brandl, R., & Brändle, M. (2013b). Recent range shifts of European dragonflies provide support for an inverse relationship between habitat predictability and dispersal. *Global Ecology and Biogeography*, *22*(4), 403-409. <https://doi.org/10.1111/geb.12004>
- Guiot, J., & Cramer, W. (2016). Climate change : The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, *354*(6311), 465-468. <https://doi.org/10.1126/science.aah5015>
- Hagerman S.M. & Pelai R. (2018). Responding to climate change in forest management: Two decades of recommendations *Front. Ecol. Environ* 16 10 <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fee.1974>
- Haguenauer, A., Zuberer, F., Ledoux, J.-B., & Aurelle, D. (2013). Adaptive abilities of the Mediterranean red coral *Corallium rubrum* in a heterogeneous and changing environment : From population to functional genetics. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *449*, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.10.010>
- Hari, R. E., Livingstone, D. M., Siber, R., Burkhardt-Holm, P., & Güttinger, H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, *12*(1), 10-26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x>
- Harper, A. B., Powell, T., Cox, P. M., House, J., Huntingford, C., Lenton, T. M., Sitch, S., Burke, E., Chadburn, S. E., Collins, W. J., Comyn-Platt, E., Daioglou, V., Doelman, J. C., Hayman, G., Robertson, E., van Vuuren, D., Wiltshire, A., Webber, C. P., Bastos, A., ... Shu, S. (2018). Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications*, *9*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05340-z>
- Harris, R. M. B., Loeffler, F., Rumm, A., Fischer, C., Horchler, P., Scholz, M., Foeckler, F., & Henle, K. (2020). Biological responses to extreme weather events are detectable but difficult to formally attribute to anthropogenic climate change. *Scientific Reports*, *10*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70901-6>
- Harvell, C. D., Mitchell, C. E., Ward, J. R., Altizer, S., Dobson, A. P., Ostfeld, R. S., & Samuel, M. D. (2002). Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science (New York, N.Y.)*, *296*(5576), 2158-2162. <https://doi.org/10.1126/science.1063699>
- Hasler, C. T., Jeffrey, J. D., Schneider, E. V. C., Hannan, K. D., Tix, J. A., & Suski, C. D. (2018). Biological consequences of weak acidification caused by elevated carbon dioxide in freshwater ecosystems. *Hydrobiologia*, *806*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3332-y>

- Heino, J., Virkkala, R., & Toivonen, H. (2009). Climate change and freshwater biodiversity: Detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 84(1), 39-54. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00060.x>
- Heinze, C., Meyer, S., Goris, N., Anderson, L., Steinfeldt, R., Chang, N., Le Quéré, C., & Bakker, D. C. E. (2015). The ocean carbon sink – impacts, vulnerabilities and challenges. *Earth System Dynamics*, 6(1), 327-358. <https://doi.org/10.5194/esd-6-327-2015>
- Hernandez, R. R., Armstrong, A., Burney, J., Ryan, G., Moore-O'Leary, K., Diédhiou, I., Grodsky, S. M., Saul-Gershenz, L., Davis, R., Macknick, J., Mulvaney, D., Heath, G. A., Easter, S. B., Hoffacker, M. K., Allen, M. F., & Kammen, D. M. (2019). Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability. *Nature Sustainability*, 2(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z>
- Hickler, T., Vohland, K., Feehan, J., Miller, P. A., Smith, B., Costa, L., Giesecke, T., Fronzek, S., Carter, T. R., Cramer, W., Kühn, I., & Sykes, M. T. (2012). Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 21(1), 50-63. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00613.x>
- Higgins, J. K., MacLean, H. J., Buckley, L. B., & Kingsolver, J. G. (2014). Geographic differences and microevolutionary changes in thermal sensitivity of butterfly larvae in response to climate. *Functional Ecology*, 28(4), 982-989. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12218>
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatziolos, M. E. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- Hof, C., Voskamp, A., Biber, M. F., Böhning-Gaese, K., Engelhardt, E. K., Niamir, A., Willis, S. G., & Hickler, T. (2018). Bioenergy cropland expansion may offset positive effects of climate change mitigation for global vertebrate diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13294-13299. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807745115>
- Homet, P., González, M., Matías, L., Godoy, O., Pérez-Ramos, I. M., García, L. V., & Gómez-Aparicio, L. (2019). Exploring interactive effects of climate change and exotic pathogens on *Quercus suber* performance: Damage caused by *Phytophthora cinnamomi* varies across contrasting scenarios of soil moisture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107605. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.06.004>
- 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(7401), 105-108. <https://doi.org/10.1038/nature11118>
- Hopkins, F. E., Nightingale, P. D., Stephens, J. A., Moore, C. M., Richier, S., Cripps, G. L., & Archer, S. D. (2020). A meta-analysis of microcosm experiments shows that dimethyl sulfide (DMS) production in polar waters is insensitive to ocean acidification. *Biogeosciences*, 17(1), 163-186. <https://doi.org/10.5194/bg-17-163-2020>
- Howden. (s. d.). *Adapting agriculture to climate change | PNAS*. Consulté 20 juillet 2023, à l'adresse <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0701890104>
- Hristov, J., Toreti, A., Perez, D. I., Dentener, F., Fellmann, T., Elleby, C., Ceglar, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Cerrani, I., Panarello, L., & Bratu, M. (2020, mai 13). *Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2760/121115>

Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Lough, J. M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S. R., Pandolfi, J. M., Rosen, B., & Roughgarden, J. (2003). Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. *Science*, *301*(5635), 929-933. <https://doi.org/10.1126/science.1085046>

Hume, B. C. C., D'Angelo, C., Smith, E. G., Stevens, J. R., Burt, J., & Wiedenmann, J. (2015). Symbiodinium thermophilum sp. Nov., a thermotolerant symbiotic alga prevalent in corals of the world's hottest sea, the Persian/Arabian Gulf. *Scientific Reports*, *5*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/srep08562>

Huntingford, C., Zelazowski, P., Galbraith, D., Mercado, L. M., Sitch, S., Fisher, R., Lomas, M., Walker, A. P., Jones, C. D., Booth, B. B. B., Malhi, Y., Hemming, D., Kay, G., Good, P., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Atkin, O. K., Lloyd, J., Gloor, E., ... Cox, P. M. (2013). Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. *Nature Geoscience*, *6*(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/ngeo1741>

IPBES (2016). The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. S.G. Potts, V. L. Imperatriz-Fonseca, and H. T. Ngo (eds). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 552 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402856>

IPBES (2018a). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392>

IPBES. (2018b). The regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia (p. 894). Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

IPCC. (2014a). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC, (2014b). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]

Jackson, J., Le Coeur, C., & Jones, O. (2022). Life history predicts global population responses to the weather in terrestrial mammals. *eLife*, *11*, e74161. <https://doi.org/10.7554/eLife.74161>

Jakoby, O.; Lischke, H.; Wermelinger, B. (2019). Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Glob. Chang. Biol.* 2019.

- Jentsch, A., & Beierkuhnlein, C. (2008). Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9), 621-628. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.002>
- Jones, H. P., Hole, D. G., & Zavaleta, E. S. (2012). Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature Climate Change*, 2(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nclimate1463>
- Kaimuddin, A. H., Laë, R., & Tito De Morais, L. (2016). Fish Species in a Changing World: The Route and Timing of Species Migration between Tropical and Temperate Ecosystems in Eastern Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00162>
- Kaneryd, L., Borrvall, C., Berg, S., Curtsdotter, A., Eklöf, A., Hauzy, C., Jonsson, T., Münger, P., Setzer, M., Säterberg, T., & Ebenman, B. (2012). Species-rich ecosystems are vulnerable to cascading extinctions in an increasingly variable world. *Ecology and Evolution*, 2(4), 858-874. <https://doi.org/10.1002/ece3.218>
- Karvonen, A., Rintamäki, P., Jokela, J., & Valtonen, E. T. (2010). Increasing water temperature and disease risks in aquatic systems: Climate change increases the risk of some, but not all, diseases. *International Journal for Parasitology*, 40(13), 1483-1488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2010.04.015>
- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P., Roces-Díaz, J. V., Rolo, V., ... Herzog, F. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83, 581-593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- Key, I. B., Smith, A. C., Turner, B., Chausson, A., Girardin, C. A. J., Macgillivray, M., & Seddon, N. (2022). Biodiversity outcomes of nature-based solutions for climate change adaptation: Characterising the evidence base. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.905767>
- Kopp, R. E., Kemp, A. C., Bittermann, K., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Gehrels, W. R., Hay, C. C., Mitrovica, J. X., Morrow, E. D., & Rahmstorf, S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1434-E1441. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517056113>
- Labbé, T., Pfister, C., Brönnimann, S., Rousseau, D., Franke, J., & Bois, B. (2019). The longest homogeneous series of grape harvest dates, Beaune 1354–2018, and its significance for the understanding of past and present climate. *Climate of the Past*, 15(4), 1485-1501. <https://doi.org/10.5194/cp-15-1485-2019>
- Lam, V., Cheung, W., Swartz, W., & Sumaila, U. (2012). Climate change impacts on fisheries in West Africa: Implications for economic, food and nutritional security. *African Journal of Marine Science*, 34(1), 103-117. <https://doi.org/10.2989/1814232X.2012.673294>
- Landmann, G., Dreyer, E., & Landeau, S. (2008). Avant-Propos - Numéro 2 - 2008 "Forêts mélangées: Quels scénarios pour l'avenir?". *Revue forestière française*, 60(2), 97-98. <https://doi.org/10.4267/2042/18130>
- Lane, J. E., Kruuk, L. E. B., Charmantier, A., Murie, J. O., & Dobson, F. S. (2012). Delayed phenology and reduced fitness associated with climate change in a wild hibernator. *Nature*, 489(7417), 554-557. <https://doi.org/10.1038/nature11335>
- Laurance, W. F., Carolina Useche, D., Shoo, L. P., Herzog, S. K., Kessler, M., Escobar, F., Brehm, G., Axmacher, J. C., Chen, I.-C., Gámez, L. A., Hietz, P., Fiedler, K., Pyrcz, T., Wolf, J., Merkord, C. L., Cardelus, C., Marshall, A. R., Ah-Peng, C., Aplet, G. H., ... Thomas, C. D. (2011). Global warming, elevational ranges and the

vulnerability of tropical biota. *Biological Conservation*, 144(1), 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.10.010>

Lavorel, S. (2013). Plant functional effects on ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101(1), 4-8. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12031>

Lavorel, S., Lebreton J-D., Le Maho, Y. (2017). « Les mécanismes d'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques et leurs limites ». Rapport adopté par l'Académie des sciences en séance plénière le 27 juin 2017. https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rads_270617.pdf

Lawrence, M. G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oshlies, A., Vaughan, N. E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J., & Scheffran, J. (2018). Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>

Leal, C.G., Lennox, G.D., Ferraz, S.F.B., Ferreira, J., Gardner, T.A., Thomson, J.R., Berenguer, E., Lees, A.C., Hughes, R.M., Mac Nally, R., Aragão, L.E.O.C., De Brito, J.G., Castello, L., Garrett, R.D., Hamada, N., Juen, L., Leitão, R.P. Louzada, J., Morello, T.F., Moura, N.G., Nessimian, J.L., Oliveira-Junior, J.M.B., Oliveira, V.H.F., de Oliveira, V.C., Parry, L., Pompeu, P.S., Solar, R.R.C., Zuanon, J., & Barlow, J. (2020). Integrated terrestrial-freshwater planning doubles conservation of tropical aquatic species. *Science* 370, 117-121(2020). DOI:10.1126/science.aba7580

Lee, S. Y., Primavera, J. H., Dahdouh-Guebas, F., McKee, K., Bosire, J. O., Cannicci, S., Diele, K., Fromard, F., Koedam, N., Marchand, C., Mendelssohn, I., Mukherjee, N., & Record, S. (2014). Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: A reassessment. *Global Ecology and Biogeography*, 23(7), 726-743. <https://doi.org/10.1111/geb.12155>

Lenoir, J., Bertrand, R., Comte, L., Bourgeaud, L., Hattab, T., Murienne, J., & Grenouillet, G. (2020). Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology & Evolution*, 4(8), Article 8. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2>

Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science (New York, N.Y.)*, 320(5884), 1768-1771. <https://doi.org/10.1126/science.1156831>

Lewis, C.T. (2020). Climate Change and the Caribbean: Challenges and Vulnerabilities in Building Resilience to Tropical Cyclones. *Climate* 2022, 10, 178. <https://doi.org/10.3390/cli10110178>

Li, J., Lin, X., Chen, A., Peterson, T., Ma, K., Bertzky, M., Ciais, P., Kapos, V., Peng, C., & Poulter, B. (2013). Global Priority Conservation Areas in the Face of 21st Century Climate Change. *PLOS ONE*, 8(1), e54839. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054839>

Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462(7276), Article 7276. <https://doi.org/10.1038/nature08649>

Lobell, D. B. (2014). Climate change adaptation in crop production: Beware of illusions. *Global Food Security*, 3(2), 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.05.002>

Logan, C. A., Dunne, J. P., Eakin, C. M., & Donner, S. D. (2014). Incorporating adaptive responses into future projections of coral bleaching. *Global Change Biology*, 20(1), 125-139. <https://doi.org/10.1111/gcb.12390>

Loisel, J., Gallego-Sala, A. V., Amesbury, M. J., Magnan, G., Anshari, G., Beilman, D. W., Benavides, J. C., Blewett, J., Camill, P., Charman, D. J., Chawchai, S., Hedgpeth, A., Kleinen, T., Korhola, A., Large, D., Mansilla,

- C. A., Müller, J., van Bellen, S., West, J. B., ... Wu, J. (2021). Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change*, *11*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- López-Medellín, X., Ezcurra, E., González-Abraham, C., Hak, J., Santiago, L. S., & Sickman, J. O. (2011). Oceanographic anomalies and sea-level rise drive mangroves inland in the Pacific coast of Mexico. *Journal of Vegetation Science*, *22*(1), 143-151.
- Lungarska, A., & Chakir, R. (2018). Climate-induced Land Use Change in France: Impacts of Agricultural Adaptation and Climate Change Mitigation. *Ecological Economics*, *147*, 134-154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.030>
- Lurgi, M., López, B. C., & Montoya, J. M. (2012). Novel communities from climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1605), 2913-2922. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0238>
- Maberly, S. C., O'Donnell, R. A., Woolway, R. I., Cutler, M. E. J., Gong, M., Jones, I. D., Merchant, C. J., Miller, C. A., Politi, E., Scott, E. M., Thackeray, S. J., & Tyler, A. N. (2020). Global lake thermal regions shift under climate change. *Nature Communications*, *11*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15108-z>
- Maes, S. L., Perring, M. P., Vanhellemont, M., Depauw, L., Van den Bulcke, J., Brümelis, G., Brunet, J., Decocq, G., den Ouden, J., Härdtle, W., Hédli, R., Heinken, T., Heinrichs, S., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Máliš, F., Wulf, M., & Verheyen, K. (2019). Environmental drivers interactively affect individual tree growth across temperate European forests. *Global Change Biology*, *25*(1), 201-217. <https://doi.org/10.1111/gcb.14493>
- Maiorano, L., Amori, G., Capula, M., Falcucci, A., Masi, M., Montemaggiore, A., Pottier, J., Psomas, A., Rondinini, C., Russo, D., Zimmermann, N. E., Boitani, L., & Guisan, A. (2013). Threats from Climate Change to Terrestrial Vertebrate Hotspots in Europe. *PLOS ONE*, *8*(9), e74989. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074989>
- Malhi, Y., Lander, T., le Roux, E., Stevens, N., Macias-Fauria, M., Wedding, L., Girardin, C., Kristensen, J. Å., Sandom, C. J., Evans, T. D., Svenning, J.-C., & Canney, S. (2022). The role of large wild animals in climate change mitigation and adaptation. *Current Biology*, *32*(4), R181-R196. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.041>
- Manes, S., Costello, M. J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.-A., Jenkins, R., Khan, T. M., Kiessling, W., Krause, C., Maharaj, S. S., Midgley, G. F., Price, J., Talukdar, G., & Vale, M. M. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*, *257*, 109070. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109070>
- Markovic, D., Carrizo, S., Freyhof, J., Cid, N., Lengyel, S., Scholz, M., Kasperdius, H., & Darwall, W. (2014). Europe's freshwater biodiversity under climate change: Distribution shifts and conservation needs. *Diversity and Distributions*, *20*(9), 1097-1107. <https://doi.org/10.1111/ddi.12232>
- Martínez-Sancho, E., & Gutiérrez Merino, E. (2019). Evidence that the Montseny Mountains are still a good climatic refugium for the southernmost silver fir forest on the Iberian Peninsula. *Dendrochronologia*, *56*, 125593. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.007>
- Masseti, J., & Wroza, S. (2019). La nature sous pression—Pourquoi la biodiversité disparaît ? Agence Française pour la Biodiversité. http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/sites/default/files/bilan_2019_onb.pdf

Massu, N. & Landmann, G. (2011). Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine, synthèse de la bibliographie. Mars 2011. ECOFOR. 180 p. ISBN 978-2-914770-04-0

Maxwell, S. L., Butt, N., Maron, M., McAlpine, C. A., Chapman, S., Ullmann, A., Segan, D. B., & Watson, J. E. M. (2019). Conservation implications of ecological responses to extreme weather and climate events. *Diversity and Distributions*, 25(4), 613-625. <https://doi.org/10.1111/ddi.12878>

McBride, M. M., Dalpadado, P., Drinkwater, K. F., Godø, O. R., Hobday, A. J., Hollowed, A. B., Kristiansen, T., Murphy, E. J., Ressler, P. H., Subbey, S., Hofmann, E. E., & Loeng, H. (2014). Krill, climate, and contrasting future scenarios for Arctic and Antarctic fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 71(7), 1934-1955. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu002>

McCusker, K. E., Battisti, D. S., & Bitz, C. M. (2015). Inability of stratospheric sulfate aerosol injections to preserve the West Antarctic Ice Sheet. *Geophysical Research Letters*, 42(12), 4989-4997. <https://doi.org/10.1002/2015GL064314>

Mcivor, A., Spencer, T., Möller, I., & Spalding, M. (2012). *Storm Surge Reduction by Mangroves*.
Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Pekel, J.-F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>

MétéoFrance 2020, <https://meteofrance.com/climathd>

Meyer, A. L. S., Bentley, J., Odoulami, R. C., Pigot, A. L., & Trisos, C. H. (2022). Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 377(1857), 20210394. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0394>

Miller-Rushing, A. J., Lloyd-Evans, T. L., Primack, R. B., & Satzinger, P. (2008). Bird migration times, climate change, and changing population sizes. *Global Change Biology*, 14(9), 1959-1972. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01619.x>

Mills, S. C., Oliver, T. H., Bradbury, R. B., Gregory, R. D., Brereton, T., Kühn, E., Kuussaari, M., Musche, M., Roy, D. B., Schmucki, R., Stefanescu, C., van Swaay, C., & Evans, K. L. (2017). European butterfly populations vary in sensitivity to weather across their geographical ranges. *Global Ecology and Biogeography*, 26(12), 1374-1385. <https://doi.org/10.1111/geb.12659>

Möller, I., Spencer, T., French, J. R., Leggett, D. J., & Dixon, M. (1999). Wave Transformation Over Salt Marshes : A Field and Numerical Modelling Study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(3), 411-426. <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0509>

Mora, C., Wei, C.-L., Rollo, A., Amaro, T., Baco, A. R., Billett, D., Bopp, L., Chen, Q., Collier, M., Danovaro, R., Gooday, A. J., Grupe, B. M., Halloran, P. R., Ingels, J., Jones, D. O. B., Levin, L. A., Nakano, H., Norling, K., Ramirez-Llodra, E., ... Yasuhara, M. (2013). Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over the 21st Century. *PLOS Biology*, 11(10), e1001682. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001682>

Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugmann, H. (2018a). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>

Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugmann, H. (2018b). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>

- Moutahir, H., Bellot, P., Monjo, R., Bellot, J., Garcia, M., & Touhami, I. (2017). Likely effects of climate change on groundwater availability in a Mediterranean region of Southeastern Spain. *Hydrological Processes*, *31*(1), 161-176. <https://doi.org/10.1002/hyp.10988>
- Mueter, F.J., Planque, B., Hunt, G.L., Alabia, I.D., Hirawake, T., Eisner, L., Dalpadado, P., Chierici, M., Drinkwater, K.F., Harada, N., Arneberg, P. & Saitoh, S-I. (2021). Possible future scenarios in the gateways to the Arctic for Subarctic and Arctic marine systems: II. Prey resources, food webs, fish, and fisheries. *ICES J. Mar. Sci.* 2021;78:3017–3045. doi: 10.1093/icesjms/fsab122
- Muluneh, A. A. (2021). The Opportunities of Working in a Challenging Environment. *Perspectives of Earth and Space Scientists*, *2*(1), e2021CN000143. <https://doi.org/10.1029/2021CN000143>
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., & Running, S. W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science (New York, N.Y.)*, *300*(5625), 1560-1563. <https://doi.org/10.1126/science.1082750>
- Neuheimer, A. B., Thresher, R. E., Lyle, J. M., & Semmens, J. M. (2011). Tolerance limit for fish growth exceeded by warming waters. *Nature Climate Change*, *1*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/nclimate1084>
- Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., & Leemans, R. (2019). Assessing the impacts of climate change on biodiversity: Is below 2 °C enough? *Climatic Change*, *154*(3), 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02420-x>
- Nussey, D. H., Postma, E., Gienapp, P., & Visser, M. E. (2005). Selection on heritable phenotypic plasticity in a wild bird population. *Science (New York, N.Y.)*, *310*(5746), 304-306. <https://doi.org/10.1126/science.1117004>
- OFME - Observatoire régional de la Forêt méditerranéenne (2018). Données & chiffres-clés de la forêt méditerranéenne en Provence-Alpes-Côte d'Azur. https://www.ofme.org/documents/Chiffres-cles/Chiffres_cles_2018_pl_web_link.pdf
- Ohashi, H., Hasegawa, T., Hirata, A. *et al.* Biodiversity can benefit from climate stabilization despite adverse side effects of land-based mitigation. *Nat Commun* 10, 5240 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13241-y>
- ONF (2015). Bilan patrimonial des forêts domaniales (p. 250). Office National des Forêts. <https://www.onf.fr/onf/+/f1::bilan-patrimonial-des-forets-domaniales-2015.html>
- Osland, M. J., Feher, L. C., Griffith, K. T., Cavanaugh, K. C., Enwright, N. M., Day, R. H., Stagg, C. L., Krauss, K. W., Howard, R. J., Grace, J. B., & Rogers, K. (2017). Climatic controls on the global distribution, abundance, and species richness of mangrove forests. *Ecological Monographs*, *87*(2), 341-359. <https://doi.org/10.1002/ecm.1248>
- Ottersen, G., Planque, B., Belgrano, A., Post, E., Reid, P. C., & Stenseth, N. C. (2001). Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*, *128*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s004420100655>
- Ovaskainen, O., Skorokhodova, S., Yakovleva, M., Sukhov, A., Kutenkov, A., Kutenkova, N., Shcherbakov, A., Meyke, E., del Mar Delgado, M. (2013). Community-level phenological response to climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2013 Aug 13;110(33):13434-9. doi: 10.1073/pnas.1305533110.

- Paerl, H. W., & Paul, V. J. (2012). Climate change : Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 46(5), 1349-1363. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002>
- Palumbi, S. R., Barshis, D. J., Traylor-Knowles, N., & Bay, R. A. (2014). Mechanisms of reef coral resistance to future climate change. *Science (New York, N.Y.)*, 344(6186), 895-898. <https://doi.org/10.1126/science.1251336>
- Paprotny, D., Terefenko, P., Giza, A., Czaplinski, P., & Voudoukas, M. I. (2021). Future losses of ecosystem services due to coastal erosion in Europe. *Science of The Total Environment*, 760, 144310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144310>
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), Article 6918. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Pauli, H., & Halloy, S. R. P. (2019). High Mountain Ecosystems Under Climate Change. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.764>
- Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R., & Zeller, D. (2002). Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418(6898), 689-695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>
- Pecl, G. T., Araújo, M. B. J., Bell, D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H. I., Martin, V. Y., McCormack, P. C., McDonald, J., Mitchell, N. J., Mustonen, T., Pandolfi, J. M., Pettorelli, N., Popova, E., Robinson, S. A., Scheffers, B. R., Shaw, J. D., Sorte, C. J. B. J., Strugnell, M. J., Sunday, M., Tuanmu, M.-N., Vergés, A., Villanueva, C., Wernberg, T., Wapstra, E., Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355, eaai9214 (2017). [10.1126/science.aai9214](https://doi.org/10.1126/science.aai9214)
- Pecquet, J., Mouchet, M., Campagne, S., Raybaud, V., Baulaz, Y., Gevaert, F., & Ben Rais Lasram, F. (2022). Combining Ecological Niche Models and ecosystem services indicators to assess impacts of climate change on kelp: Application to French coasts. *Ecosystems and People*, 18(1), 358-377. <https://doi.org/10.1080/26395916.2022.2080766>
- Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proença, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P. W., Fernandez-Manjarrés, J. F., Araújo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W. L., Chini, L., Cooper, H. D., Gilman, E. L., Guénette, S., Hurtt, G. C., Huntington, H. P., Mace, G. M., Oberdorff, T., Revenga, C., ... Walpole, M. (2010). Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science*, 330(6010), 1496-1501. <https://doi.org/10.1126/science.1196624>
- Peringer, A., Frank, V., & Snell, R. S. (2022). Climate change simulations in Alpine summer pastures suggest a disruption of current vegetation zonation. *Global Ecology and Conservation*, 37, e02140. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02140>
- Perugini, L., Caporaso, L., Marconi, S., Cescatti, A., Quesada, B., Noblet-Ducoudré, N. de, House, J. I., & Arneth, A. (2017). Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b3f>
- Pimm, S. L., Jenkins, C. N., Abell, R., Brooks, T. M., Gittleman, J. L., Joppa, L. N., Raven, P. H., Roberts, C. M., & Sexton, J. O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 344(6187), 1246752. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>

- Pincebourde, S., & Casas, J. (2015). Warming tolerance across insect ontogeny: Influence of joint shifts in microclimates and thermal limits. *Ecology*, *96*(4), 986-997. <https://doi.org/10.1890/14-0744.1>
- Pincebourde, S., Sinoquet, H., Combes, D., & Casas, J. (2007). Regional climate modulates the canopy mosaic of favourable and risky microclimates for insects. *Journal of Animal Ecology*, *76*(3), 424-438. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01231.x>
- Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., Schoeman, D. S., Moore, P. J., Brander, K., Bruno, J. F., Buckley, L. B., Burrows, M. T., Duarte, C. M., Halpern, B. S., Holding, J., Kappel, C. V., O'Connor, M. I., Pandolfi, J. M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S. A., & Richardson, A. J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, *3*(10), Article 10. <https://doi.org/10.1038/nclimate1958>
- Pörtner, H. O., & Knust, R. (2007). Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science (New York, N.Y.)*, *315*(5808), 95-97. <https://doi.org/10.1126/science.1135471>
- Pörtner, H.-O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneeth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W. L. (William), Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., ... Ngo, H. (2021). *Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5101125>
- Potter, K., Davidowitz, G., & Woods, H. A. (2009). Insect eggs protected from high temperatures by limited homeothermy of plant leaves. *Journal of Experimental Biology*, *212*(21), 3448-3454. <https://doi.org/10.1242/jeb.033365>
- Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., Dicks, L. V., Garibaldi, L. A., Hill, R., Settele, J., & Vanbergen, A. J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, *540*(7632), 220-229. <https://doi.org/10.1038/nature20588>
- Pounds, J. A., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P. L., Foster, P. N., La Marca, E., Masters, K. L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S. R., Sánchez-Azofeifa, G. A., Still, C. J., & Young, B. E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, *439*(7073), 161-167. <https://doi.org/10.1038/nature04246>
- Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H., & Somorin, O. A. (2012). Forests and trees for social adaptation to climate variability and change. *WIREs Climate Change*, *3*(6), 581-596. <https://doi.org/10.1002/wcc.195>
- Prober, S. M., Doerr, V. A. J., Broadhurst, L. M., Williams, K. J., & Dickson, F. (2019). Shifting the conservation paradigm: A synthesis of options for renovating nature under climate change. *Ecological Monographs*, *89*(1), e01333. <https://doi.org/10.1002/ecm.1333>
- Rabouille, C., Conley, D. J., Dai, M. H., Cai, W.-J., Chen, C. T. A., Lansard, B., Green, R., Yin, K., Harrison, P. J., Dagg, M., & McKee, B. (2008). Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: The Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhône rivers. *Continental Shelf Research*, *28*(12), 1527-1537. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.01.020>
- Record, S., Charney, N. D., Zakaria, R. M., & Ellison, A. M. (2013). Projecting global mangrove species and community distributions under climate change. *Ecosphere*, *4*(3), art34. <https://doi.org/10.1890/ES12-00296.1>
- Reed, T.E., Jenouvrier, S., & Visser M.E. (2013). Phenological mismatch strongly affects individual fitness but not population demography in a woodland passerine. *Journal of Animal Ecology* *82*(1):131-144 (s. d.).

Consulté 19 juillet 2023, à l'adresse <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2656.2012.02020.x>

Reusch, T. B. H. (2014). Climate change in the oceans : Evolutionary versus phenotypically plastic responses of marine animals and plants. *Evolutionary Applications*, 7(1), 104-122. <https://doi.org/10.1111/eva.12109>

Rodriguez, W., Feller, I. C., & Cavanaugh, K. C. (2016). Spatio-temporal changes of a mangrove–saltmarsh ecotone in the northeastern coast of Florida, USA. *Global Ecology and Conservation*, 7, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.07.005>

Riou-Nivert P., 2015, Adaptation au changement climatique et gestion forestière, In L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, ONERC, La documentation française, Paris, 77-107.

Roemmich, D., & McGowan, J. (1995). Climatic Warming and the Decline of Zooplankton in the California Current. *Science*, 267(5202), 1324-1326. <https://doi.org/10.1126/science.267.5202.1324>

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., van Vuuren, D. P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., ... Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>

Rogers, A., Blanchard, J. L., & Mumby, P. J. (2014). Vulnerability of Coral Reef Fisheries to a Loss of Structural Complexity. *Current Biology*, 24(9), 1000-1005. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.026>

Rondinini, C., & Visconti, P. (2015). Scenarios of large mammal loss in Europe for the 21st century. *Conservation Biology*, 29(4), 1028-1036. <https://doi.org/10.1111/cobi.12532>

Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268-3273.

Roth, T., Plattner, M., & Amrhein, V. (2014). Plants, Birds and Butterflies : Short-Term Responses of Species Communities to Climate Warming Vary by Taxon and with Altitude. *PLOS ONE*, 9(1), e82490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082490>

Runting, R. K., Bryan, B. A., Dee, L. E., Maseyk, F. J. F., Mandle, L., Hamel, P., Wilson, K. A., Yetka, K., Possingham, H. P., & Rhodes, J. R. (2017). Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: A review. *Global Change Biology*, 23(1), 28-41. <https://doi.org/10.1111/gcb.13457>

Saintilan, N., Wilson, N. C., Rogers, K., Rajkaran, A., & Krauss, K. W. (2014). Mangrove expansion and salt marsh decline at mangrove poleward limits. *Global Change Biology*, 20(1), 147-157. <https://doi.org/10.1111/gcb.12341>

Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R. B., Atwood, T. B., Auber, A., Cheung, W., Costello, C., Ferretti, F., Friedlander, A. M., Gaines, S. D., Garilao, C., Goodell, W., Halpern, B. S., Hinson, A., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Leprieux, F., McGowan, J., ... Lubchenco, J. (2021). Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature*, 592(7854), Article 7854. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03371-z>

- Saltré, F., Duputié, A., Gaucherel, C., & Chuine, I. (2015). How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech. *Global Change Biology*, 21(2), 897-910. <https://doi.org/10.1111/gcb.12771>
- Saltré, F., Saint-Amant, R., Gritti, E. S., Brewer, S., Gaucherel, C., Davis, B. A. S., & Chuine, I. (2013). Climate or migration : What limited European beech post-glacial colonization? *Global Ecology and Biogeography*, 22(11), 1217-1227. <https://doi.org/10.1111/geb.12085>
- Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerrillo, R. M., Swetnam, T. W., & Zavala, M. A. (2012). Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 271, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.040>
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Oliva, J., Montes, F., & Gazol, A. (2015). Past logging, drought and pathogens interact and contribute to forest dieback. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.011>
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Gutiérrez, E., Linares, J. C., Génova, M., Ribas, M., Tíscar, P. A., & López-Sáez, J. A. (2019). Droughts and climate warming desynchronize Black pine growth across the Mediterranean Basin. *The Science of the Total Environment*, 697, 133989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133989>
- Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R., & Thirel, G. (2021). Predicting flow intermittence in France under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 66(14), 2046-2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444>
- Schiffer, M., Hangartner, S., & Hoffmann, A. A. (2013). Assessing the relative importance of environmental effects, carry-over effects and species differences in thermal stress resistance : A comparison of *Drosophilids* across field and laboratory generations. *The Journal of Experimental Biology*, 216(Pt 20), 3790-3798. <https://doi.org/10.1242/jeb.085126>
- Schloss. (s. d.). *Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere / PNAS*. Consulté 20 juillet 2023, à l'adresse <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1116791109>
- Schmitz, O. J., Wilmers, C. C., Leroux, S. J., Doughty, C. E., Atwood, T. B., Galetti, M., Davies, A. B., & Goetz, S. J. (2018). Animals and the zoogeography of the carbon cycle. *Science*, 362(6419), eaar3213. <https://doi.org/10.1126/science.aar3213>
- Scholes, B. (2010). *Biodiversity Scenarios: Projections of 21st century change in biodiversity and associated ecosystem services*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Biodiversity-Scenarios%3A-Projections-of-21st-century-Scholes/c4799ebbd299f57f131c29d9813c2449741a9802>
- Schweinsberg, M., Weiss, L. C., Striewski, S., Tollrian, R., & Lampert, K. P. (2015). More than one genotype : How common is intracolony genetic variability in scleractinian corals? *Molecular Ecology*, 24(11), 2673-2685. <https://doi.org/10.1111/mec.13200>
- Seddon, N., Turner, B., Berry, P., Chausson, A., & Girardin, C. A. J. (2019). Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0405-0>
- Seebacher, F., White, C. R., & Franklin, C. E. (2015). Physiological plasticity increases resilience of ectothermic animals to climate change. *Nature Climate Change*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/nclimate2457>

Shamberger, K. E. F., Cohen, A. L., Golbuu, Y., McCorkle, D. C., Lentz, S. J., & Barkley, H. C. (2014). Diverse coral communities in naturally acidified waters of a Western Pacific reef. *Geophysical Research Letters*, 41(2), 499-504. <https://doi.org/10.1002/2013GL058489>

Shin, Y.-J., Midgley, G. F., Archer, E. R. M., Arneth, A., Barnes, D. K. A., Chan, L., Hashimoto, S., Hoegh-Guldberg, O., Insarov, G., Leadley, P., Levin, L. A., Ngo, H. T., Pandit, R., Pires, A. P. F., Pörtner, H.-O., Rogers, A. D., Scholes, R. J., Settele, J., & Smith, P. (2022). Actions to halt biodiversity loss generally benefit the climate. *Global Change Biology*, 28(9), 2846-2874. <https://doi.org/10.1111/gcb.16109>

Sinervo, B., Méndez-De-La-Cruz, F., Miles, D.B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., Lara-Resendiz, R., Martínez-Méndez, N., Calderón-Espinosa, M. M., Meza-Lázaro, R. N., Gadsden, H., Avila, L.J., Morando, M., De La Riva, I.J., Sepulveda, P.V., Duarte Rocha, C.F., Ibarguengoytia, N., Puntriano, C.A., Massot, M., Lepetz, V., Oksanen, T.A., Chapple, D.G., Bauer, A.M., Branch, W.R., Clobert, J. & Sites J. W.Jr. (2010). Erosion of Lizard Diversity by Climate Change and Altered Thermal Niches. *Science* 328, 894-899(2010). DOI:10.1126/science.1184695

Slangen, A. B. A., Carson, M., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Köhl, A., Vermeersen, L. L. A., & Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124(1), 317-332. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>

Smith, P., Price, J., Molotoks, A., Warren, R., & Malhi, Y. (2018). Impacts on terrestrial biodiversity of moving from a 2°C to a 1.5°C target. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160456. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0456>

Sordello, R., Conruyt-Rogéon, G., & Touroult, J. (s. d.). *La fonctionnalité des continuités écologiques*.

Stram, D. L., & Evans, D. C. K. (2009). Fishery management responses to climate change in the North Pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1633-1639. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp138>

Svartzman, R., Espagne, E., Gauthey, J., Hadji-Lazaro, P., Salin, M., Allen, T., Berger, J., Calas, J., Godin, A. & Vallier, A. (2021). A "Silent Spring" for the Financial System? Exploring Biodiversity-Related Financial Risks in France. Banque de France. <https://publications.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/wp826.pdf>

Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I., Perez, V., Gégout-Petit, A., Nageleisen, L.-M., Bontemps, J.-D., & Gégout, J.-C. (2019). Background mortality drivers of European tree species: Climate change matters. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1900), 20190386. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0386>

Talukder, B., Ganguli, N., Matthew, R., vanLoon, G. W., Hipel, K. W., & Orbinski, J. (2022). Climate change-accelerated ocean biodiversity loss & associated planetary health impacts. *The Journal of Climate Change and Health*, 6, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2022.100114>

Tambutté, E., Venn, A. A., Holcomb, M., Segonds, N., Techer, N., Zoccola, D., Allemand, D., & Tambutté, S. (2015). Morphological plasticity of the coral skeleton under CO₂-driven seawater acidification. *Nature Communications*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms8368>

Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: Just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany*, 63(1), 25-31. <https://doi.org/10.1093/jxb/err269>

Teagle, H., Hawkins, S. J., Moore, P. J., & Smale, D. A. (2017). The role of kelp species as biogenic habitat formers in coastal marine ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 492, 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.01.017>

- Thackeray, S. J., Henrys, P. A., Hemming, D., Bell, J. R., Botham, M. S., Burthe, S., Helaouet, P., Johns, D. G., Jones, I. D., Leech, D. I., Mackay, E. B., Massimino, D., Atkinson, S., Bacon, P. J., Brereton, T. M., Carvalho, L., Clutton-Brock, T. H., Duck, C., Edwards, M., ... Wanless, S. (2016). Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature*, *535*(7611), 241-245. <https://doi.org/10.1038/nature18608>
- Thiel, D., Nagy, L., Beierkuhnlein, C., Huber, G., Jentsch, A., Konnert, M., & Kreyling, J. (2012). Uniform drought and warming responses in *Pinus nigra* provenances despite specific overall performances. *Forest Ecology and Management*, *270*, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.034>
- Thomas, N., Lucas, R., Bunting, P., Hardy, A., Rosenqvist, A., & Simard, M. (2017). Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. *PLoS ONE* *12*(6): e0179302. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179302>
- Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangeat, I., Lafourcade, B., & Araujo, M. B. (2011). Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, *470*(7335), 531-534. <https://doi.org/10.1038/nature09705>
- Toby Kiers, E., Palmer, T. M., Ives, A. R., Bruno, J. F., & Bronstein, J. L. (2010). Mutualisms in a changing world: An evolutionary perspective. *Ecology Letters*, *13*(12), 1459-1474. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01538.x>
- Torquebiau, E. (ed). (2015). *Changement climatique et agricultures du monde*. Ed. Quae. <https://agritrop.cirad.fr/575558/>
- Trisos, C. H., Merow, C., & Pigot, A. L. (2020). The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, *580*(7804), Article 7804. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2189-9>
- Urban, M. C. (2015). Climate change. Accelerating extinction risk from climate change. *Science (New York, N.Y.)*, *348*(6234), 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- Valladares, F., Gianoli, E., & Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, *176*(4), 749-763. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x>
- Van Dijk, H., & Hautekèete, N. (2007). Long day plants and the response to global warming: Rapid evolutionary change in day length sensitivity is possible in wild beet. *Journal of Evolutionary Biology*, *20*(1), 349-357. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2006.01192.x>
- Van Oppen, M. J. H., Souter, P., Howells, E. J., Heyward, A., & Berkelmans, R. (2011). Novel Genetic Diversity Through Somatic Mutations: Fuel for Adaptation of Reef Corals? *Diversity*, *3*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/d3030405>
- van Heerwaarden, B., Kellermann, V., & Sgrò, C. M. (2016). Limited scope for plasticity to increase upper thermal limits. *Functional Ecology*, *30*(12), 1947-1956. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12687>
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Hinkel, J., Ward, P. J., Mongelli, I., Ciscar, J.-C., & Feyen, L. (2020). Economic motivation for raising coastal flood defenses in Europe. *Nature Communications*, *11*, 2119. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15665-3>
- Wahli, T., Bernet, D., Segner, H., & Schmidt-Posthaus, H. (2008). Role of altitude and water temperature as regulating factors for the geographical distribution of *Tetracapsuloides bryosalmonae* infected fishes in Switzerland. *Journal of Fish Biology*, *73*(9), 2184-2197. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02054.x>

Wang, C., Tang, Y., Li, X., Zhang, W., Zhao, C., & Li, C. (2020). Negative impacts of plant diversity loss on carbon sequestration exacerbate over time in grasslands. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104055. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaf88>

Warren, D. L., Matzke, N. J., & Iglesias, T. L. (2020). Evaluating presence-only species distribution models with discrimination accuracy is uninformative for many applications. *Journal of Biogeography*, 47(1), 167-180. <https://doi.org/10.1111/jbi.13705>

Warren, R., Price, J., VanDerWal, J., Cornelius, S., Sohl, H. The Implications of the United Nations Paris Agreement on Climate Change for Globally Significant Biodiversity Areas. Climatic Change, 2018. Climatic Change, 2018 https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-03/180314_Rapport_Especes_Climat.pdf

Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J. A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T. J., Jarvis, A., Shoo, L. P., Williams, S. E., & Lowe, J. (2013). Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change*, 3(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nclimate1887>

Watson, C. S., White, N. J., Church, J. A., King, M. A., Burgette, R. J., & Legresy, B. (2015). Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era. *Nature Climate Change*, 5(6), Article 6. <https://doi.org/10.1038/nclimate2635>

Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T., & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(30), 12377-12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>

Wilkinson, C., & Reef, R. F. R. C. (Australia). (s. d.). *Status of coral reefs of the world: 2008; 2008*.

Woods H. A. (2013). Ontogenetic changes in the body temperature of an insect herbivore. *Funct. Ecol.* 27, 1322–1331. doi:10.1111/1365-2435.12124. Consulté 19 juillet 2023, à l'adresse <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1365-2435.12124>

Xu, C., Kohler, T.A., Lenton, T.M., Svenning J-C. & Scheffer, M. (2020). Future of the human climate niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (21) 11350-11355

Zanatta, F., Engler, R., Collart, F., Broennimann, O., Mateo, R. G., Papp, B., Muñoz, J., Baurain, D., Guisan, A., & Vanderpoorten, A. (2020). Bryophytes are predicted to lag behind future climate change despite their high dispersal capacities. *Nature Communications*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19410-8>

Zarnetske. (s. d.). *Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth / PNAS*. Consulté 21 juillet 2023, à l'adresse <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1921854118>

Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.-C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., ... Olesen, J. E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, 138, 126516. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., ... Zeng, N. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6(8), Article 8. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

Ziska, L., Knowlton, K., Rogers, C., Dalan, D., Tierney, N., Elder, M. A., Filley, W., Shropshire, J., Ford, L. B., Hedberg, C., Fleetwood, P., Hovanky, K. T., Kavanaugh, T., Fulford, G., Vrtis, R. F., Patz, J. A., Portnoy, J., Coates, F., Bielory, L., & Frenz, D. (2011). Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(10), 4248-4251. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014107108>