RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Institut de Recherche pour le Développement
FRANCE

Communauté de savoirs
Biodiversité

© IRD - Olivier Dangles

Pourquoi lier la résolution de la crise de la biodiversité à celle de la crise climatique ?

Isabelle Biegala, Olivier Dangles, Nicolas Hubert, Marie-Pierre Ledru, François Le Loch, Luc Maeght, Thierry Oberdorff, Marc Pouilly, Yves Vigouroux, Sébastien Barot

Pourquoi lier la résolution de la crise de la biodiversité à celle de la crise climatique ?

Isabelle Biegala, Olivier Dangles, Nicolas Hubert, Marie-Pierre Ledru, François Le Loch, Luc Maeght, Thierry Oberdorff, Marc Pouilly, Yves Vigouroux, Sébastien Barot

1 Introduction

De plus en plus de voix appellent à résoudre simultanément la crise du climat et celle de la biodiversité. Cela est justifié par de nombreux arguments. Ainsi, les mêmes mécanismes liés à la surexploitation des ressources et des écosystèmes par les sociétés humaines conduisent conjointement à ces deux crises. On peut donc probablement résoudre les deux crises simultanément en jouant sur les mêmes leviers. De plus, les changements climatiques ont globalement un impact négatif sur la biodiversité et il faut faire attention à ne pas privilégier la résolution d'une seule crise. Cela pourrait par exemple conduire à choisir des modes d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques ayant un impact négatif sur la biodiversité. Inversement, les écosystèmes contrôlent certains flux (carbone, azote…) pouvant ainsi accélérer ou freiner les changements climatiques. La résolution des crises climatiques et de la biodiversité passe donc par le maintien d'écosystèmes en "bonne santé", par exemple capables de stocker du carbone.

En outre, on peut considérer que les pays du Sud, les pays à bas revenus, victimes de la crise climatique alors que les pays du Nord sont les premiers responsables de cette crise du fait de leur utilisation historique très importante de combustibles fossiles. De même, par exemple du fait de l'importation de produits ayant un impact négatif sur la biodiversité (huile de palme…), les pays du Nord contribuent aussi aux pertes de biodiversité au Sud. Cela montre bien que les pays du Nord ont une responsabilité importante vis-à-vis des pays du Sud, et ce d'autant plus que de nombreuses populations de ces pays sont à la fois vulnérables vis-à-vis du changement climatique (qui peut par exemple être très dommageable pour l'agriculture) et des pertes de biodiversité (les populations étant dépendantes de la "bonne santé des écosystèmes"). Le but de la présente note est ainsi de mieux expliquer pourquoi les résolutions des crises climatiques et de la biodiversité doivent être intimement liées, en particulier au sein des politiques publiques.

2 Impact du climat sur la biodiversité

Tout au long de son existence, l'espèce humaine a manipulé et transformé la nature et exploité les ressources naturelles vivantes et non-vivantes pour s'adapter à la variabilité temporelle et spatiale de l'environnement terrestre. Cette adaptation, facilitée par le développement de technologies nécessitant l'usage de plus en plus d'énergie, a permis d'améliorer nos conditions de vie et de faciliter la croissance de la population humaine mondiale, mais au prix d'inégalités sociales et économiques très importantes (Independent Group of Scientists appointed by the Secretary General 2019, Messerli et al. 2019). Par ailleurs, ces activités ont conduit à des modifications sans précédent du fonctionnement physique, chimique et écologique de la planète terre en comparaison des dynamiques préhumaines. Ces tendances négatives se sont mises en place au cours de l'Holocène (Ellis et al. 2021), avec une accélération au cours des derniers 5000 ans (Nogué et al. 2021) du fait de changements technologiques et d'augmentations de la population humaine à très grande échelle. Actuellement, les sociétés humaines et leurs croissances démographiques et économiques contribuent d'une manière disproportionnée aux changements globaux, dont les changements climatiques, et à la crise de la biodiversité (Crist et al. 2017, Sage 2020). Cette exploitation non-durable des ressources de la planète est principalement due au pays les plus industrialisés et menace en définitive l'existence même de l'espèce humaine (Independent Group of Scientists 2020). Les impacts sur la physico-chimie de l'environnement de notre planète, qui constituent autant de pressions sur la biodiversité, sont bien établis : (1) augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (principalement CO_2, CH_4, NO_x) et les changements climatiques consécutifs, l'acidification des eaux océaniques et continentales, (2) appropriation et la transformation des écosystèmes par les humains (transformation en zone agricole et de pâturage, urbanisation, artificialisation des réseaux de cours d'eau, accaparement de l'eau pour l'industrie et l'irrigation, transformation des côtes), (3) pollutions (engrais, pesticides, plastiques), bouleversement des cycles mondiaux du carbone et de l'azote impliquant des rétroactions avec la biodiversité (Arneth et al. 2020, Ripple et al. 2020). Tous ces facteurs, leurs interactions et la surexploitation directe de la biodiversité (chasse, pêche, exploitation forestière) ont et vont continuer à menacer conjointement le climat de la terre et sa biodiversité en modifiant les aires de distribution des espèces et leurs abondances, en restructurant les communautés animales et végétales, les réseaux trophiques et le fonctionnement des écosystèmes. Cela conduit in fine à des rétroactions négatives multiples sur le bien-être des humains, spécialement dans les pays en voie

de développement où vivent des sociétés souvent vulnérables (Independent Group of Scientists 2020). Ainsi, sans effort pour contrecarrer le changement climatique, la surexploitation des espèces et la dégradation des écosystèmes (Arneth et al. 2020, Mori 2020, Thomas 2020), la biodiversité va continuer à décliner avec des impacts négatifs très forts sur les sociétés humaines.

Un des facteurs majeurs et directs de la distribution de la biodiversité à la surface de la terre est le climat. Il agit directement, en interaction avec la géologie, sur la spéciation, l'extinction des espèces et la dispersion des individus en conditionnant la disponibilité de l'eau et de l'énergie (Hawkins et al. 2003, Evans et al. 2005). Le climat et la biodiversité sont si intimement liés que ce n'est pas une réelle surprise que la distribution des espèces à la surface du globe change actuellement avec une vitesse croissante en lien avec le changement climatique provoqué par les activités humaines. Des preuves scientifiques s'accumulent pour montrer que de nombreuses espèces terrestres et aquatiques répondent au réchauffement global en changeant leur distribution pour gagner des altitudes plus élevées, de plus grandes profondeurs dans les océans, ou des latitudes plus élevées (allant vers le Nord dans l'hémisphère nord)(Pecl et al. 2017). Il y a aussi des preuves suggérant que les changements dans la distribution des espèces sont idiosyncratiques et dépendent des habitats. Par exemple, dans les océans les espèces se déplacent vers les pôles six fois plus vite que sur les continents (Lenoir et al. 2020). Cette réponse différente des espèces au climat promeut et continuera à promouvoir une recomposition constante des communautés végétales et animales, ce qui impacte les réseaux trophiques et le fonctionnement des écosystèmes et affecte la disponibilité des ressources et des services fournis par les écosystèmes aux humains, particulièrement dans les pays en voie de développement (Pecl et al. 2017, Ojea et al. 2020).

Cependant, le réchauffement climatique ne peut expliquer à lui seul l'ensemble des changements des aires de distribution des espèces. D'autres facteurs comme (1) les traits écologiques liés à la capacité de dispersion ou aux limites physiologiques des espèces sont impliqués (Williams et al. 2008, Sunday et al. 2015, Pfeifer et al. 2017), (2) la capacité de compétition (Davidson et al. 2020, Legault et al. 2020), ou (3) les barrières naturelles (montagnes, terres pour les espèces aquatiques, eaux pour les espèces terrestres) et celles créées par les humains (changements d'usage des sols, barrage …)(Oliver and Morecroft 2014, Winemiller et al. 2016, Betts et al. 2019). Ces barrières (Arneth et al. 2010, Franca et al. 2020) peuvent elles-mêmes être créées par les changements climatiques (assèchement d'écosystèmes aquatiques, désertification, événements climatiques extrêmes). Il reste que les espèces qui n'arrivent pas à changer leur aire de

distribution suffisamment vite pour suivre le changement climatique sont menacées d'extinction (Urban 2015). Le danger est encore plus grand pour des espèces qui sont adaptées à un climat qui va disparaitre et ne peuvent donc pas juste changer leur distribution géographique. C'est le cas des espèces vivant en altitude et à des latitudes élevées qui sont très touchées par l'augmentation des températures. Les espèces tropicales de plaine sont a priori plus touchées par les changements de régime de pluie. De plus, le changement est loin d'être le facteur causant actuellement le plus d'extinctions d'espèce (IPBES 2019). La transformation des écosystèmes (par exemple la déforestation) et l'exploitation directe de la biodiversité (par la chasse, la pêche…) causent plus d'extinction d'espèces que le changement climatique. Mais, bien sûr, toutes les pressions anthropiques pesant sur la biodiversité interagissent et agissent en synergie, et le changement climatique pourrait devenir une pression de plus en plus forte si les sociétés humaines n'arrivent pas à limiter ce changement.

3 Rétroaction de la biodiversité et des écosystèmes sur le climat

Si le changement climatique n'est pour le moment pas la principale cause d'extinction d'espèces il modifie déjà très fortement le fonctionnement des écosystèmes. Une question peut ainsi être de déterminer quels écosystèmes vont voir leur production primaire augmenter ou diminuer et comment cela va se traduire en termes de stockage de carbone dans la biomasse et la matière organique morte (dans les sédiments et les sols). Si à l'échelle globale les écosystèmes stockent de plus en plus de carbone, cela va freiner le réchauffement climatique puisque cela contribuera à diminuer la teneur de l'atmosphère en CO_2. Prédire les rétroactions entre changement climatique et fonctionnement des écosystèmes reste ainsi un sujet de recherche crucial tant les enjeux sont importants, et les mécanismes et interactions impliqués complexes et tant il est difficile d'en prévoir le résultat (Field et al. 2007, Lade et al. 2019). Certains écosystèmes vont clairement voir leur production primaire augmenter du fait de l'augmentation des températures, qui y améliore les conditions de croissance de la végétation comme les zones actuelles de toundra ou de taïga (Oechel and Vourlitis 1994, Yu et al. 2017). Dans ces zones, il faut cependant prendre en compte le dégel de pergélisols qui conduit à une reprise des activités microbiennes dans ces sols conduisant à la décomposition rapide de très importants stocks de matière organique (voir ci-dessous) s'étant accumulés du fait des faibles température et aux émissions de CO_2 correspondantes (Schuur et al.

2015). Aux mêmes latitudes, dans les zones humides cela peut aussi conduire à de fortes émissions de méthanes, un autre gaz à fort effet de serre. Dans les zones tempérées et tropicales, l'augmentation des températures, surtout s'il s'accompagne de sécheresse, a au contraire tendance à conduire à des diminutions de la production primaire (Zhao and Running 2010).

D'une manière très générale, la dégradation des écosystèmes et les pertes de biodiversité rétroagissent sur le changement climatique. La biodiversité, en termes de richesse spécifique, n'est pas distribuée de façon homogène et tend à se concentrer sur des zones ne représentant qu'un faible pourcentage de la surface du globe (Lamoreux et al. 2006, Kier et al. 2009). Les point-chauds de biodiversité font partie de ces zones remarquables, tout en se distinguant par des niveaux extrêmement élevés d'endémisme. La protection de leur biodiversité représente ainsi un enjeu important pour la conservation de la biodiversité à l'échelle mondiale (Myers et al. 2000) mais aussi un enjeu pour la protection du climat. Ainsi, le sixième rapport (AR6) du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, WG2) montre que les zones à forte biodiversité, tels que les point-chauds de biodiversité, semblent mieux résister aux changements climatiques, avec des pertes de biodiversité et des projections de changement dans le fonctionnement des écosystèmes plus faible qu'ailleurs. Cette tendance met en évidence des rétroactions entre biodiversité et climat dont l'ensemble des mécanismes et leurs conséquences restent méconnus. Sur le temps court, les écosystèmes très riches en biodiversité présentent une forte redondance fonctionnelle (Mouillot et al. 2014), se traduisant par une plus grande stabilité de leur fonctionnement et des services écosystémiques (e.g. stockage carbone) associés qu'ils fournissent (Loreau et al. 2003, Isbell et al. 2011). Sur le temps long, un nombre croissant d'études montrent que les point-chauds de biodiversité ont accumulé la diversité au cours du temps, en raison d'une plus grande stabilité écologique et climatique au cours du Quaternaire (Sundaram et al. 2019, Brown et al. 2020). Dans les point-chauds de biodiversité, ces deux catégories de mécanisme ont une influence respective variable, suivant la latitude et les trajectoires historiques qui ont présidé à leur mise en place (Wiens and Donoghue 2004). Evidemment, ces mécanismes sont aussi en interaction, ce qui rend difficile l'évaluation séparée de leurs impacts. Toutefois, à latitude équivalente, le sixième rapport de l'IPCC prédit des dynamiques particulières dans les point-chauds de la zone intertropicale, probablement en lien avec la diversité et l'intensité des perturbations anthropiques qu'ils subissent, fragilisant plus encore ces point-chauds et les rétroactions entre la biodiversité et le climat. Cette situation questionne l'avenir des systèmes

alimentaires chez les populations dépendant fortement de la faune et flore sauvage (Thiault et al. 2019), dont les peuples autochtones, ou encore le futur de l'agroécologie et du développement durable dans ces point-chauds (Thiault et al. 2019). D'une manière générale, ces dynamiques d'interaction entre climat et biodiversité sont sensibles à toutes les pressions anthropiques, exploitation directe de la biodiversité, fragmentation des habitats, déforestation, pratiques agricoles non-durables … participant à la dégradation du fonctionnement des écosystèmes.

Sur les continents, les sols jouent un rôle particulier dans la mesure où ils stockent, sous forme de matière organique morte, plus de carbone que celui contenu dans l'atmosphère sous forme de CO_2 et dans la biomasse des plantes (Jobbágy and Jackson 2000). De faibles changements dans le flux de carbone vers les sols (stockage) ou partant des sols (déstockage) peuvent avoir une influence notable sur le climat. Les sols et leur matière organique morte sont ainsi au centre de nombreuses interactions climatiques et écologiques. (1) La décomposition de la matière organique augmente quand le climat fournit un contexte plus chaud et plus humide, favorisant ainsi le métabolisme des microorganismes consommant cette matière, ce qui a tendance à déstocker du carbone. (2) Le stock de matière organique morte tend à augmenter quand la production primaire augmente et donc quand l'écosystème considéré fonctionne bien, ce qui implique au moins un certain niveau de biodiversité. Certains résultats montrent qu'augmenter la diversité végétale augmente le stock de carbone dans les sols (Fornara and Tilman 2008). (3) Le stockage de matière organique morte dépend aussi de processus compliqués dépendant de la diversité microbienne du sol (Fontaine and Barot 2005) et de toute sa faune (Lavelle et al. 2006). Certains organismes comme les vers de terre peuvent sur le court terme accélérer la décomposition de la matière organique mais, sur le long terme, peuvent stabiliser une partie de la matière organique par la création d'agrégats de sols et leur action générale sur la structure du sol (Bertrand et al. 2015). (4) Plus un sol est riche en matière organique plus il facilite une production primaire importante : la matière organique morte est une réserve de nutriments minéraux (sous forme organique), elle augmente la capacité du sol à retenir l'eau et les nutriments minéraux (sous forme minérale, cations). Pour toutes ces raisons, la dégradation des écosystèmes passe souvent par celle des sols, et une diminution de leur contenu en matière organique morte, et vice-versa, et une question scientifique cruciale et non-complètement résolue (Jastrow et al. 2005, Davidson and Janssens 2006, Hungate et al. 2009) reste de savoir si dans les différents biomes (et à l'échelle globale) les changements climatiques en cours (et l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 qui tend à augmenter la production

primaire), en interactions avec les changements d'usage des sols et les autres pressions anthropiques, va diminuer ou augmenter le stock de matière organique morte dans les sols, conduisant ainsi par rétroaction à accélérer ou freiner les changements climatiques. En particulier, la déforestation (au moins à court terme) et des pratiques agricoles intensives (exportation de la biomasse, travail du sol intensif) conduisent à diminuer le stock de matière organique des sols. A l'inverse, on peut penser que protéger des écosystèmes riches en biodiversité, restaurer des écosystèmes et leur bon fonctionnement (Sala et al. 2021) et développer des pratiques agricoles favorisant le stockage de matière organique dans les sols (Dignac et al. 2017), contribuera à freiner le changement climatique, à fournir de nombreux services écosystémiques, entre autres en favorisant la sécurité alimentaire et la durabilité de nos systèmes alimentaires (Lal 2004).

Les feux, fréquents dans de nombreux écosystèmes, ont une influence majeure sur la dynamique des écosystèmes et du climat, en particulier en zone tropicale. Certains écosystèmes comme les savanes et certaines prairies sont adaptés aux feux, les plantes y poussant survivant majoritairement aux feux. L'existence de ces écosystèmes peut même dépendre des feux (Bond and Keeley 2005, Bond 2016): le maintien d'une partie des savanes, définies comme des écosystèmes où des graminées et des arbres coexistent, dépend des feux (naturels ou d'origine anthropique) qui empêchent les arbres de recouvrir l'ensemble de l'écosystème, ce qui transformerait la savane en forêt. A l'inverse, les feux sont dommageables pour d'autres écosystèmes comme les forêts tropicales humides. Ces écosystèmes ne sont pas adaptés au feu, ils ne brûlent qu'en cas de sécheresse prononcées ou d'action humaine et le feu conduit alors à des pertes de biodiversité et peuvent être liés à la déforestation. Dans tous les cas, les feux brûlent une biomasse importante, de la litière de feuille à la surface du sol et de la matière organique morte dans les premiers centimètres du sol. Ils contribuent ainsi au réchauffement climatique (Lasslop et al. 2019) surtout quand ils contribuent à la déforestation. L'impact des feux sur le fonctionnement du sol et le carbone qu'il contient est complexe, et si les feux émettent beaucoup de carbone à court terme, ils peuvent aussi contribuer à stocker sur le long terme du carbone dans les sols sous forme de carbone pyrogénique (''black carbone'')(Li et al. 2021). En savane, l'intensité des feux (et donc leurs impacts) dépend en partie des conditions climatiques les mois précédents qui influencent la biomasse herbacée, principale source de combustibles. Enfin, des rétroactions complexes entre feux et climats peuvent conduire à des changements rapides de type de végétation. Les feux sont donc ainsi au cœur de nombreuses interactions et rétroactions impliquant le climat et la

biodiversité. Leur gestion et les réglementations impliquées sont donc un enjeu important. Dans les pays tropicaux, les ‘‘feux de brousse’’ sont souvent officiellement interdits. L’idée est avant tout de protéger les populations humaines, et éventuellement de freiner le changement climatique en favorisant le boisement, mais ces réglementations ne sont souvent pas adaptées et peuvent au final défavoriser la biodiversité des savanes, déjà menacée par de nombreuses pressions anthropiques (Parr et al. 2014).

Les océans jouent un rôle particulier et primordial dans le cycle du carbone. 50% de la fixation biologique du carbone par la photosynthèse est assurée par le phytoplancton qui ne représentent que 0,2% de la biomasse en carbone à l’échelle de la biosphère. Cela représente ainsi une biomasse faible par rapport à la biomasse des organismes terrestres, mais cette biomasse est très dynamique. Une partie de cette biomasse est consommée par du zooplancton et intègre alors le réseau trophique marin. Le reste de cette biomasse, une fois morte, s’enfonce dans la colonne d’eau vers le fond des océans et contribue au piégeage et à la séquestration du carbone dans les sédiments. On parle de pompe biologique océanique. Du fait de la très grande quantité de carbone fixée par ce phytoplancton océanique, de petites différences dans cette fixation et dans la part de ce carbone stocké sur le long terme au fond des océans a un impact sur la teneur atmosphérique en CO_2 et donc sur le changement climatique (Honjo et al. 2014). A l’inverse, le changement climatique et ses effets sur la température de l’eau, la teneur en CO_2 des eaux qui s’élèvent avec la teneur atmosphérique en CO_2 ce qui acidifie les océans, la stratification des eaux océaniques, les courants océaniques, influencent ces processus créant ainsi une boucle complexe de rétroactions (Boyd 2015). Cette boucle est fortement influencée par la biodiversité et de nombreuses interactions écologiques. La variabilité de l’exportation de carbone vers le fond des océans est ainsi fortement liée à la structure de taille du phytoplancton. Globalement, on peut dire que le phytoplancton eucaryote de grande taille domine les eaux riches en nutriments minéraux, présentes en milieux tempérés, froids où dans les zones d'upwelling tropicales ou équatoriales, et que le petit phytoplancton essentiellement procaryote et eucaryote domine les eaux pauvres. Du fait de leur biomasse considérable, l'export de carbone vers le fond des océans des eaux riches et froides est 300 fois supérieur à celui des eaux pauvres et chaudes.

4 Solutions fondées sur la nature pour le climat et la

biodiversité

Les ‘‘solutions fondées sur la nature’’ sont définies par l’UICN comme les actions qui s’appuient sur les écosystèmes afin de relever les défis globaux comme la lutte contre les changements climatiques ou la gestion des risques naturels. Cette notion très large reste encore floue et peut recouper des actions extrêmement diverses depuis la simple protection d’un écosystème (qui va du coup continuer à remplir des services écosystémiques) à la conception de nouveaux écosystèmes comme les toitures végétalisées urbaines. L’appropriation de la notion et sa mise en pratique par les acteurs et les décideurs reste très imparfaite, probablement particulièrement dans les pays du Sud. Sa mise en application requiert le développement de connaissances très intégratives allant de connaissances naturalistes ‘‘de bases’’ (Quelles sont les espèces en présence ? Quelles sont leurs caractéristiques ?) à des connaissances poussées sur le rôle de ces espèces dans le fonctionnement de l’écosystème ou la diversité génétique de ces espèces (qui leur permet par exemple de s’adapter aux changements climatiques et peut influencer les services écosystémiques qu’elles rendent). Le développement des solutions fondées sur la nature demande aussi de développer des recherches interdisciplinaires impliquant des sciences humaines et sociales diverses pour comprendre, par exemple, quels sont les besoins des communautés locales en services écosystémiques, quelles pressions climatiques s’exercent sur elles ou quel cadre juridique et économique est nécessaire pour les solutions fondées sur la nature. Ces connaissances sont souvent incomplètes, en particulier dans les pays du Sud abritant une biodiversité extrêmement élevée et n’ayant souvent pas les moyens de développer les recherches nécessaires.

L’ampleur du déficit de connaissance ‘‘de base’’ sur la biodiversité apparait de plus en plus clairement, à mesure que l’inventaire du vivant intègre de façon croissante de nouvelles approches moléculaires (Monaghan et al. 2009, Butcher et al. 2012, Delrieu-Trottin et al. 2019, Sharkey et al. 2021). En particulier, la notion d’espèce cryptique, espèces morphologiquement indiscernables, a rapidement émergé au cours des deux dernières décennies comme une caractéristique proéminente des écosystèmes tropicaux (Bickford et al., 2007), remettant parfois en question notre perception des patrons de diversité (Hubert et al. 2012). Ce déficit constitue actuellement un frein aux recherches sur la relation biodiversité/climat, ainsi que la conservation de la biodiversité (Garnett and Christidis 2017), qui est à la base des solutions fondées sur la nature, et correspond à une demande forte aux Suds en matière de renforcement des capacités. Le développement de nouvelles approches moléculaires d’identification du vivant (DNA barcoding, metabarcoding, ADN

environnemental) ouvre de nouvelles perspectives en offrant une palette d'outils permettant d'accélérer considérablement l'acquisition de connaissance sur l'identité et la distribution des espèces, et ainsi caractériser les dynamiques écologiques à l'œuvre dans les écosystèmes, et les interactions entre biodiversité et climat.

Les forêts tropicales sont un bon exemple des enjeux liés aux solutions fondées sur la nature. Ces forêts abritent environ la moitié de la biodiversité terrestre et représentent d'importants puits de carbone pour lutter contre le réchauffement global. Afin de pérenniser ces solutions durables fondées sur la nature, il est fondamental d'inciter à la collaboration entre les pays du Nord et du Sud (ODD nº17 sur le partenariat pour l'atteinte des objectifs) afin de protéger les forêts dont l'exploitation représente parfois localement des sources importantes de revenus et d'emploi. Des initiatives internationales ont été lancées ces 15 dernières années (en 2007 en Equateur, en 2019 au Gabon), qui proposaient une suspension de l'exploitation des forêts ou de leurs sous-sols, en échange d'un dédommagement financier de la part de la communauté internationale. Si les apports financiers sont investis pour la lutte contre la pauvreté et les inégalités dans les pays hébergeant les forêts tropicales, ce type d'accords internationaux permettrait de responsabiliser la communauté internationale à la notion de communs planétaires et de solutions durables tout en tentant de minimiser les frictions entre objectifs du développement durable (nexus climat - biodiversité - inégalité - travail décent). Il est par exemple important que les solutions fondées sur la nature participent à la fois à la résolution de la crise climatique et de la crise de la biodiversité. Ainsi, il est crucial que des solutions visant à freiner le changement climatique n'aggravent pas la crise de la biodiversité (Gardner et al. 2012). Par exemple, si on replante des forêts détruites par la déforestation il faut que ces forêts soient basées sur une diversité d'espèces d'arbres locales et permettre à ses forêts d'abriter une biodiversité (animale et végétale) élevée. A priori, cette biodiversité devrait aussi être favorable aux objectifs d'atténuation du changement climatique parce que la biodiversité peut rendre la forêt plus résiliente vis-à-vis des perturbations et augmenter le stockage de carbone dans les sols et la biomasse.

L'agroécologie peut être vue comme un des champs principaux d'application des solutions fondées sur la nature (Altieri 1989, Barot et al. 2012). Son développement dans les pays du Sud est un enjeu crucial pour rendre l'agriculture plus durable, en évitant de se baser uniquement sur le modèle de l'agriculture intensive développée dans les pays du Nord, et en intensifiant écologiquement les pratiques traditionnelles. L'agroécologie est liée à la biodiversité dans le sens

où (1) son impact sur la biodiversité est a priori moins important que des formes d'agriculture basées sur beaucoup d'intrants (engrais, pesticides…), (2) elle dépend elle-même fortement de la biodiversité non-cultivée (organismes du sol, organismes auxiliaires…) et cultivée (dans la mesure où elle doit tirer le meilleur parti possible de la diversité génétique des plantes cultivées, utiliser des associations de variétés et d'espèces, par exemple dans le cadre de l'agroforesterie). L'agroécologie est liée à la crise climatique parce qu'elle doit être basée sur les processus naturels de régulation de la fertilité des sols et implique d'augmenter la quantité de matière organique des sols (et donc leur stock de carbone). A l'inverse, l'agroécologie pourrait contribuer à l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique, au moins en utilisant au mieux la diversité génétique des plantes cultivées. Dans tous les cas, l'impact négatif de l'agriculture sur la biodiversité et le climat étant tellement forts et la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire, en particulier celle des populations des pays du Sud, met la réforme du système agricole et alimentaire au cœur d'un nexus crucial pour l'avenir de la biosphère et des sociétés humaines.

5 Exemple de programmes de recherche à l'IRD liant biodiversité et climat

De nombreux chercheurs de l'IRD et leurs partenaires du Sud travaillent sur des thématiques alliant climat et biodiversité.

Par exemple, dans le cadre du LMI BIO_INCA (Biodiversité et Agriculture durables dans les Andes tropicales, www.bioinca.org), une étude internationale et transdisciplinaire de l'impact social et environnemental de la disparition des glaciers a été lancée. L'augmentation rapide des températures a entraîné partout dans le monde une fonte importante des glaciers. En effet, d'ici 2100, la masse des glaciers devrait diminuer de 35% à 55% à l'échelle mondiale et jusqu'à 90% en Europe et dans les régions tropicales. Ces changements climatiques vont induire des modifications importantes dans la disponibilité des ressources en eau et la structure et le fonctionnement des communautés animales et végétales (Cauvy-Fraunié and Dangles 2019). Mais ils vont aussi menacer les liens culturels et d'usage millénaires entre les populations locales et les glaciers. L'objectif des recherches menées dans le cadre du LMI est de croiser différentes expertises scientifiques (glaciologues, climatologues, hydrologues, écologues, sociologues, historiens et philosophes) sur la fonte des glaciers et leurs conséquences, dans les Andes tropicales. Ainsi, il sera possible d'estimer, grâce à un large éventail technologique, les conséquences physiques,

écologiques et spirituelles de l'extinction des glaciers. Entre autres, les chercheurs établiront des cartes prédictives de l'extinction des glaciers, cataloguerons les organismes menacés d'extinction ou ceux qui pourront s'adapter et détermineront quels seraient les impacts sociaux et culturels dans les communautés de montagne. Au-delà de ces recherches, le but est de coconstruire avec les acteurs locaux (parcs nationaux, fonds pour l'eau, communautés locales) des solutions adaptatives pour affronter au mieux les nouvelles exigences d'un futur sans glace (Dangles 2020).

Par ailleurs, les écotones entre grands biomes sont étudiés mondialement, par exemple à l'interface entre savanes et forêts tropicales, savanes et déserts, etc. Ils peuvent correspondre à des transitions spatiales progressives, mais aussi à des transitions brutales conduisant à des mosaïques d'écosystèmes fortement contrastées. Cela suggère que ces transitions sont par nature dynamiques, et susceptibles de déboucher sur des changements brusques de couvertures végétales. Elles sont sous l'influence du climat aux plus larges échelles, tout en étant localement régulées par les caractéristiques du sol, les activités humaines et des rétroactions écologiques complexes. Les écotones tropicaux abordés par nos travaux sont de signification mondiale, non seulement comme signaux d'alerte précoces annonçant le changement climatique, mais aussi comme sites de biodiversité remarquable. Cette biodiversité provient non seulement de l'interpénétration entre biomes, mais aussi de la présence d'espèces endémiques, adaptées aux conditions spécifiques de l'écotone. Cette problématique générale a par exemple conduit à étudier la biodiversité des arbres des forêts africaines et à prédire leur réponse aux changement global (Rejou-Mechain et al. 2021).

L'étude des mangroves est emblématique des recherches interdisciplinaires menées à l'IRD sur les socio-écosystèmes et leur capacité d'adaptation aux changements climatiques. La Guyane Française, contenant 70 à 80% des surfaces de mangroves françaises (et européennes), s'avère un chantier crucial pour l'étude des relations entre la dynamique des écosystèmes et les espèces végétales qu'ils contiennent et le climat dans un contexte encore préservé mais de très grande dynamique côtière. Les recherches qui y sont menées mettent en avant le rôle des mangroves pour aider à prédire l'érosion côtière (notion de solution fondée sur la Nature)(Proisy et al. 2021) ou la nécessité de mieux comprendre et prédire le cycle du carbone de ces écosystèmes (stocks et flux) dans une interface côtière soumise aux aléas océaniques (Walcker et al. 2018). Les implications sont régionales (Brésil, Surinam, Guyana) mais également internationales (restauration des mangroves).

Bibliographie

Altieri, M. A. 1989. Agroecology - a new research and development paradigm for world agriculture. Agriculture Ecosystems & Environment **27**:37-46.

Arneth, A., S. P. Harrison, S. Zaehle, K. Tsigaridis, S. Menon, P. J. Bartlein, J. Feichter, A. Korhola, M. Kulmala, D. O'Donnell, G. Schurgers, S. Sorvari, and T. Vesala. 2010. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system. Nature Geoscience **3**:525-532.

Arneth, A., Y. J. Shin, P. Leadley, C. Rondinini, E. Bukvareva, M. Kolb, G. F. Midgley, T. Oberdorff, I. Palomo, and O. Saito. 2020. Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. **117**:30882-30891.

Barot, S., J.-C. Lata, and G. Lacroix. 2012. Meeting the relational challenge of ecological engineering. Ecological Engineering **45**:13-23.

Bertrand, M., S. Barot, M. Blouin, J. K. Whalen, T. de Oleivera, and J. Roger-Estrade. 2015. Earthworm services for cropping systems. a review. Agriculture for Sutainable Development **35**:553-567.

Betts, M. G., C. Wolf, M. Pfeifer, C. Banks-Leite, V. Arroyo-Rodríguez, D. B. Ribeiro, J. Barlow, F. Eigenbrod, D. Faria, R. J. Fletcher, A. S. Hadley, J. E. Hawes, R. D. Holt, B. Klingbeil, U. Kormann, L. Lens, T. Levi, G. F. Medina-Rangel, S. L. Melles, D. Mezger, J. C. Morante-Filho, C. D. L. Orme, C. A. Peres, B. T. Phalan, A. Pidgeon, H. Possingham, W. J. Ripple, E. M. Slade, E. Somarriba, J. A. Tobias, J. M. Tylianakis, J. N. Urbina-Cardona, J. J. Valente, J. I. Watling, K. Wells, O. R. Wearn, E. Wood, R. Young, and R. M. Ewers. 2019. Extinction filters mediate the global effects of habitat fragmentation on animals. Science **366**:1236-1239.

Bond, W. J. 2016. Ancient grasslands at risk. Science **351**:120-122.

Bond, W. J. and J. E. Keeley. 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. Trends in Ecology and Evolution **20**.

Boyd, P. W. 2015. Toward quantifying the response of the oceans' biological pump to climate change. Frontiers in Marine Science **2**.

Brown, S. C., T. M. L. Wigley, B. L. Otto-Bliesner, C. Rahbek, and D. A. Fordham. 2020. Persistent Quaternary climate refugia are hospices for biodiversity in the Anthropocene. Nature Climate Change **10**:244-248.

Butcher, B. A., M. A. Smith, M. J. Sharkey, and D. L. J. Quicke. 2012. A turbo-taxonomic study of Thai *Aleiodes* (*Aleiodes*) and *Aleiodes* (*Arcaleiodes*) (Hymenoptera: Braconidae: Rogadiniae) based largely on COI barcoded specimens, with rapid descriptions of 179 new species. Zootaxa **3457**:1–232.

Cauvy-Fraunié, S. and O. Dangles. 2019. A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. Nature Ecology & Evolution **3**:1675-1685.

Crist, E., C. Mora, and R. Engelman. 2017. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. Science **356**:260-264.

Dangles, O. 2020. Éloge des glaciers, ces dragons du froid qui inquiètent et fascinent The Conversation **Octobre**.

Davidson, E. A. and I. A. Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedback to climate change. Nature **440**:165-173.

Davidson, S. C. and G. Bohrer and E. Gurarie and S. LaPoint and P. J. Mahoney and N. T. Boelman

and J. U. H. Eitel and L. R. Prugh and L. A. Vierling and J. Jennewein and E. Grier and O. Couriot and A. P. Kelly and A. J. H. Meddens and R. Y. Oliver and R. Kays and M. Wikelski and T. Aarvak and J. T. Ackerman and J. A. Alves and E. Bayne and B. Bedrosian and J. L. Belant and A. M. Berdahl and A. M. Berlin and D. Berteaux and J. Bêty and D. Boiko and T. L. Booms and B. L. Borg and S. Boutin and W. S. Boyd and K. Brides and S. Brown and V. N. Bulyuk and K. K. Burnham and D. Cabot and M. Casazza and K. Christie and E. H. Craig and S. E. Davis and T. Davison and D. Demma and C. R. DeSorbo and A. Dixon and R. Domenech and G. Eichhorn and K. Elliott and J. R. Evenson and K.-M. Exo and S. H. Ferguson and W. Fiedler and A. Fisk and J. Fort and A. Franke and M. R. Fuller and S. Garthe and G. Gauthier and G. Gilchrist and P. Glazov and C. E. Gray and D. Grémillet and L. Griffin and M. T. Hallworth and A.-L. Harrison and H. L. Hennin and J. M. Hipfner and J. Hodson and J. A. Johnson and K. Joly and K. Jones and T. E. Katzner and J. W. Kidd and E. C. Knight and M. N. Kochert and A. Kölzsch and H. Kruckenberg and B. J. Lagassé and S. Lai and J.-F. Lamarre and R. B. Lanctot and N. C. Larter and A. D. M. Latham and C. J. Latty and J. P. Lawler and D.-J. Léandri-Breton and H. Lee and S. B. Lewis and O. P. Love and J. Madsen and M. Maftei and M. L. Mallory and B. Mangipane and M. Y. Markovets and P. P. Marra and R. McGuire and C. L. McIntyre and E. A. McKinnon and T. A. Miller and S. Moonen and T. Mu and G. J. D. M. Müskens and J. Ng and K. L. Nicholson and I. J. Øien and C. Overton and P. A. Owen and A. Patterson and A. Petersen and I. Pokrovsky and L. L. Powell and R. Prieto and P. Quillfeldt and J. Rausch and K. Russell and S. T. Saalfeld and H. Schekkerman and J. A. Schmutz and P. Schwemmer and D. R. Seip and A. Shreading and M. A. Silva and B. W. Smith and F. Smith and J. P. Smith and K. R. S. Snell and A. Sokolov and V. Sokolov and D. V. Solovyeva and M. S. Sorum and G. Tertitski and J. F. Therrien and K. Thorup and T. L. Tibbitts and I. Tulp and B. D. Uher-Koch and R. S. A. van Bemmelen and S. Van Wilgenburg and A. L. Von Duyke and J. L. Watson and B. D. Watts and J. A. Williams and M. T. Wilson and J. R. Wright and M. A. Yates and D. J. Yurkowski and R. Žydelis and M. Hebblewhite. 2020. Ecological insights from three decades of animal movement tracking across a changing Arctic. Science **370**:712-715.

Delrieu-Trottin, E., J. T. Williams, D. Pitassy, A. Driskell, N. Hubert, J. Viviani, T. H. Cribb, B. Espiau, R. Galzin, M. Kulbicki, T. Lison de Loma, C. Meyer, J. Mourier, G. Mou-Tham, V. Parravicini, P. Plantard, P. Sasal, G. Siu, N. Tolou, M. Veuille, L. Weigt, and S. Planes. 2019. A DNA barcode reference library of French Polynesian shore fishes. Scientific Data **6**:114.

Dignac, M.-F., D. Derrien, P. Barré, S. S. Barot, L. Cécillon, C. Chenu, T. Chevallier, G. T. Freschet, P. Garnier, B. Guenet, M. Hedde, K. Klumpp, G. Lashermes, P.-A. Maron, N. Nunan, C. Roumet, and I. Basile-Doelsch. 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. Agronomy for Sustainable Development **37**:14.

Ellis, E. C., N. Gauthier, K. Klein Goldewijk, R. Bliege Bird, N. Boivin, S. Diaz, D. Q. Fuller, J. L. Gill, J. O. Kaplan, N. Kingston, H. Locke, C. N. H. McMichael, D. Ranco, T. C. Rick, M. R. Shaw, L. Stephens, J. C. Svenning, and J. E. M. Watson. 2021. People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. Proceedings of the National Academy of Science of the USA **118**.

Evans, K. L., P. H. Warren, and K. J. Gaston. 2005. Species-energy relationships at the macroecological scale: a review of the mechanisms. Biological Review of the Cambrige Philosophical Society **80**:1-25.

Field, C. B., D. B. Lobell, H. A. Peters, and N. R. Chiariello. 2007. Feedbacks of Terrestrial

Ecosystems to Climate Change. Annual Review of Environment and Resources **32**:1-29.
Fontaine, S. and S. Barot. 2005. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation. Ecology Letters **8**:1075-1087.
Fornara, D. A. and D. Tilman. 2008. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. Journal of Ecology **96**:314-322.
Franca, F. M., C. E. Benkwitt, G. Peralta, J. P. W. Robinson, N. A. J. Graham, J. M. Tylianakis, E. Berenguer, A. C. Lees, J. Ferreira, J. Louzada, and J. Barlow. 2020. Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci **375**:20190116.
Gardner, T. A., N. D. Burgess, N. Aguilar-Amuchastegui, J. Barlow, E. Berenguer, T. Clements, F. Danielsen, J. Ferreira, W. Foden, V. Kapos, S. M. Khan, A. C. Lees, L. Parry, R. M. Roman-Cuesta, C. B. Schmitt, N. Strange, I. Theilade, and I. C. G. Vieira. 2012. A framework for integrating biodiversity concerns into national REDD+ programmes. Biological Conservation **154**:61-71.
Garnett, S. T. and L. Christidis. 2017. Taxonomy anarchy hampers conservation. Nature **546**:25-27.
Hawkins, B. A., R. Field, H. V. Cornell, D. J. Currie, J.-F. Guégan, D. M. Kaufman, J. T. Kerr, G. G. Mittelbach, T. Oberdorff, E. M. O'Brien, E. E. Porter, and J. R. G. Turner. 2003. Energy, water, and borad-scale geographic patterns of species richness. Ecology **84**:3105-3117.
Honjo, S., T. I. Eglinton, C. D. Taylor, K. M. Ulmer, S. M. Sievert, A. Bracher, C. R. German, V. Edgcomb, R. Francois, M. D. Inglesias-Rodriguez, B. Van Mooy, and D. J. Repeta. 2014. Understanding the role of the biological pump in the global carbon cycle: an imperative for ocean science. Oceanography **27**:10-16.
Hubert, N., C. P. Meyer, H. J. Bruggemann, F. Guerin, R. J. Komeno, B. Espiau, R. Causse, J. T. Williams, and S. Planes. 2012. Cryptic diversity in Indo-Pacific coral-reef fishes revealed by DNA-barcoding provides new support to the centre-of-overlap hypothesis. PLoS One **7**:e28987.
Hungate, B. A., K.-J. van Groenigen, J. Six, J. D. Jastrow, Y. Luo, M.-A. de Graaff, C. van Kessel, and C. W. Osenberg. 2009. Assessing the effect of elevated carbon dioxide on soil carbon: a comparison of four meta-analyses. Global Change Biology **15**:2020-2034.
Independent Group of Scientists. 2020. Human Development Report 2020. The next frontier: human development and the anthropocene UNDP, United Nations.
Independent Group of Scientists appointed by the Secretary General. 2019. Global sustainable development report 2019: the future is now – science for achieving sustainable development. United Nations.
IPBES. 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany.
Isbell, F., V. Calcagno, A. Hector, J. Connolly, W. S. Harpole, P. B. Reich, M. Scherer-Lorenzen, B. Schmid, D. Tilman, J. van Ruijven, A. Weigelt, B. J. Wilsey, E. S. Zavaleta, and M. Loreau. 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. Nature **477**:199-202.
Jastrow, J. D., R. Michael Miller, R. Matamala, R. J. Norby, T. W. Boutton, C. W. Rice, and C. E. Owensby. 2005. Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon. Global Change Biology **11**:2057-2064.
Jobbágy, E. G. and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications **10**:423-436.

Kier, G., H. Kreft, T. M. Lee, W. Jetz, P. L. Ibisch, C. Nowicki, J. Mutke, and W. Barthlott. 2009. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. Proceedings of the National Academy of Sciences **106**:9322-9327.

Lade, S. J., J. Norberg, J. M. Anderies, C. Beer, S. E. Cornell, J. F. Donges, I. Fetzer, T. Gasser, K. Richardson, J. Rockström, and W. Steffen. 2019. Potential feedbacks between loss of biosphere integrity and climate change. Global Sustainability **2**.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science **304**:1623-1627.

Lamoreux, J. F., J. C. Morrison, T. H. Ricketts, D. M. Olson, E. Dinerstein, M. W. McKnight, and H. H. Shugart. 2006. Global tests of biodiversity concordance and the importance of endemism. Nature **440**:212-214.

Lasslop, G., A. I. Coppola, A. Voulgarakis, C. Yue, and S. Veraverbeke. 2019. Influence of Ffre on the carbon cycle and climate. Current Climate Change Reports **5**:112-123.

Lavelle, P., T. Decaëns, M. Aubert, S. Barot, M. Blouin, F. Bureau, P. Margerie, P. Mora, and J.-P. Rossi. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. European Journal of Soil Biology **42**:S3-S15.

Legault, G., M. E. Bitters, A. Hastings, and B. A. Melbourne. 2020. Interspecific competition slows range expansion and shapes range boundaries. Proceedings of the National Academy of Science USA **117**:26854-26860.

Lenoir, J., R. Bertrand, L. Comte, L. Bourgeaud, T. Hattab, J. Murienne, and G. Grenouillet. 2020. Species better track climate warming in the oceans than on land. Nature Ecology & Evolution **4**:1044-1059.

Li, J., J. Pei, J. Liu, J. Wu, B. Li, C. Fang, and M. Nie. 2021. Spatiotemporal variability of fire effects on soil carbon and nitrogen: A global meta-analysis. Global Change Biology **27**:4196-4206.

Loreau, M., N. Mouquet, and A. Gonzalez. 2003. Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences **100**:12765-12770.

Messerli, P., E. M. Kim, W. Lutz, J.-P. Moatti, K. Richardson, M. Saidam, D. Smith, P. Eloundou-Enyegue, E. Foli, A. Glassman, G. H. Licona, E. Murniningtyas, J. K. Staniškis, J.-P. van Ypersele, and E. Furman. 2019. Expansion of sustainability science needed for the SDGs. Nature Sustainability **2**:892-894.

Monaghan, M. T., R. Wild, M. Elliot, T. Fujisawa, M. Balke, D. J. G. Inward, D. C. Lees, R. Ranaivosolo, P. Eggleton, T. G. Barraclough, and A. P. Vogler. 2009. Accelerated species inventory on Madagascar using coalescent-based models of species delineation. Systematic Biology **58**:298-311.

Mori, A. S. 2020. Advancing nature-based approaches to address the biodiversity and climate emergency. Ecology Letters **23**:1729-1732.

Mouillot, D., S. Villeger, V. Parravicini, M. Kulbicki, J. E. Arias-Gonzalez, M. Bender, P. Chabanet, S. R. Floeter, A. Friedlander, L. Vigliola, and D. R. Bellwood. 2014. Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs. Proc Natl Acad Sci U S A **111**:13757-13762.

Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, and J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature **403**:853-858.

Nogué, S., S. A. M. C., H. J. B. Birks, S. Björck, A. Castilla-Beltrán, S. Connor, E. J. de Boer, L. de Nascimento, V. A. Felde, J. M. Fernández-Palacios, C. A. Froyd, S. G. Haberle, H. Hooghiemstra, K. Ljung, S. J. Norder, J. Peñuelas, M. Prebble, J. Stevenson, R. J. Whittaker, K. J. Willis, J. M. Wilmshurst, and M. J. Steinbauer. 2021. The human dimension

of biodiversity changes on islands. Science **372**:488–491.
Oechel, W. C. and G. L. Vourlitis. 1994. The effects of climate charge on land—atmosphere feedbacks in arctic tundra regions. Trends in Ecology and Evolution **9**:324-329.
Ojea, E., S. E. Lester, and D. Salgueiro-Otero. 2020. Adaptation of fishing communities to climate-driven shifts in target species. One Earth **2**:544-556.
Oliver, T. H. and M. D. Morecroft. 2014. Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. **5**:317-335.
Parr, C. L., C. E. Lehmann, W. J. Bond, W. A. Hoffmann, and A. N. Andersen. 2014. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. Trends in ecology & evolution **29**:205-213.
Pecl, G. T., M. B. Araujo, J. D. Bell, J. Blanchard, T. C. Bonebrake, I. C. Chen, T. D. Clark, R. K. Colwell, F. Danielsen, B. Evengard, L. Falconi, S. Ferrier, S. Frusher, R. A. Garcia, R. B. Griffis, A. J. Hobday, C. Janion-Scheepers, M. A. Jarzyna, S. Jennings, J. Lenoir, H. I. Linnetved, V. Y. Martin, P. C. McCormack, J. McDonald, N. J. Mitchell, T. Mustonen, J. M. Pandolfi, N. Pettorelli, E. Popova, S. A. Robinson, B. R. Scheffers, J. D. Shaw, C. J. Sorte, J. M. Strugnell, J. M. Sunday, M. N. Tuanmu, A. Verges, C. Villanueva, T. Wernberg, E. Wapstra, and S. E. Williams. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. Science **355**.
Pfeifer, M., V. Lefebvre, C. A. Peres, C. Banks-Leite, O. R. Wearn, C. J. Marsh, S. H. M. Butchart, V. Arroyo-Rodriguez, J. Barlow, A. Cerezo, L. Cisneros, N. D'Cruze, D. Faria, A. Hadley, S. M. Harris, B. T. Klingbeil, U. Kormann, L. Lens, G. F. Medina-Rangel, J. C. Morante-Filho, P. Olivier, S. L. Peters, A. Pidgeon, D. B. Ribeiro, C. Scherber, L. Schneider-Maunoury, M. Struebig, N. Urbina-Cardona, J. I. Watling, M. R. Willig, E. M. Wood, and R. M. Ewers. 2017. Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. Nature **551**:187-191.
Proisy, C., R. Walcker, E. Blanchard, A. Gardel, and E. J. Anthony. 2021. Chapter 2 - Mangroves: a natural early-warning system of erosion on open muddy coasts in French Guiana. Pages 47-66 *in* F. Sidik and D. A. Friess, editors. Dynamic sedimentary environments of mangrove soasts. Elsevier.
Rejou-Mechain, M., F. Mortier, J. F. Bastin, G. Cornu, N. Barbier, N. Bayol, F. Benedet, X. Bry, G. Dauby, V. Deblauwe, J. L. Doucet, C. Doumenge, A. Fayolle, C. Garcia, J. P. Kibambe Lubamba, J. J. Loumeto, A. Ngomanda, P. Ploton, B. Sonke, C. Trottier, R. Vimal, O. Yongo, R. Pelissier, and S. Gourlet-Fleury. 2021. Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. Nature **593**:90-94.
Ripple, W. J., C. Wolf, T. M. Newsome, P. Barnard, and W. R. Moomaw. 2020. 2020
World scientists' warning of a climate emergency. BioScience **70**:8-12.
Sage, R. F. 2020. Global change biology: a primer. Global Change Biology **26**:3-30.
Sala, E., J. Mayorga, D. Bradley, R. B. Cabral, T. B. Atwood, A. Auber, W. Cheung, C. Costello, F. Ferretti, A. M. Friedlander, S. D. Gaines, C. Garilao, W. Goodell, B. S. Halpern, A. Hinson, K. Kaschner, K. Kesner-Reyes, F. Leprieur, J. McGowan, L. E. Morgan, D. Mouillot, J. Palacios-Abrantes, H. P. Possingham, K. D. Rechberger, B. Worm, and J. Lubchenco. 2021. Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. Nature **592**:397-402.
Schuur, E. A., A. D. McGuire, C. Schadel, G. Grosse, J. W. Harden, D. J. Hayes, G. Hugelius, C. D. Koven, P. Kuhry, D. M. Lawrence, S. M. Natali, D. Olefeldt, V. E. Romanovsky, K. Schaefer, M. R. Turetsky, C. C. Treat, and J. E. Vonk. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature **520**:171-179.
Sharkey, M. J., D. H. Janzen, W. Hallwachs, E. G. Chapman, M. A. Smith, T. Dapkey, A. Brown,

S. Ratnasingham, S. Naik, R. Manjunath, K. Perez, M. Milton, P. Hebert, S. R. Shaw, R. N. Kittel, M. A. Solis, M. A. Metz, P. Z. Goldstein, J. W. Brown, D. L. J. Quicke, C. v. Achterberg, B. V. Brown, and J. M. Burns. 2021. Minimalist revision and description of 403 new species in 11 subfamilies of Costa Rican braconid parasitoid wasps, including host records for 219 species. ZooKeys:1+.

Sundaram, M., M. J. Donoghue, A. Farjon, D. Filer, S. Mathews, W. Jetz, and A. B. Leslie. 2019. Accumulation over evolutionary time as a major cause of biodiversity hotspots in conifers. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **286**.

Sunday, J. M., G. T. Pecl, S. Frusher, A. J. Hobday, N. Hill, N. J. Holbrook, G. J. Edgar, R. Stuart-Smith, N. Barrett, T. Wernberg, R. A. Watson, D. A. Smale, E. A. Fulton, D. Slawinski, M. Feng, B. T. Radford, P. A. Thompson, and A. E. Bates. 2015. Species traits and climate velocity explain geographic range shifts in an ocean-warming hotspot. Ecology Letters **18**:944-953.

Thiault, L., C. Mora, J. E. Cinner, W. W. L. Cheung, N. A. J. Graham, F. A. Januchowski-Hartley, D. Mouillot, U. R. Sumaila, and J. Claudet. 2019. Escaping the perfect storm of simultaneous climate change impacts on agriculture and marine fisheries. Science Advances **5**:eaaw9976.

Thomas, C. D. 2020. The development of Anthropocene biotas. Philosophical Transactions of the Royal Society London B Biological Sciences **375**:20190113.

Urban, M. C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. climate,climate change,biodiversity **348**:571-573.

Walcker, R., L. Gandois, C. Proisy, D. Corenblit, E. Mougin, C. Laplanche, R. Ray, and F. Fromard. 2018. Control of "blue carbon" storage by mangrove ageing: Evidence from a 66-year chronosequence in French Guiana. Global Change Biology **24**:2325-2338.

Wiens, J. J. and M. J. Donoghue. 2004. Historical biogeography, ecology and species richness. Trends Ecol Evol **19**:639-644.

Williams, S. E., L. P. Shoo, J. L. Isaac, A. A. Hoffmann, and G. Langham. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. Plos Biology **6**:e325.

Winemiller, K. O., P. B. McIntyre, L. Castello, E. Fluet-Chouinard, T. Giarrizzo, S. Nam, I. G. Baird, W. Darwall, N. K. Lujan, I. Harrison, M. L. J. Stiassny, R. A. M. Silvano, D. B. Fitzgerald, F. M. Pelicice, A. A. Agostinho, L. C. Gomes, J. S. Albert, E. Baran, M. Petrere, C. Zarfl, M. Mulligan, J. P. Sullivan, C. C. Arantes, L. M. Sousa, A. A. Koning, D. J. Hoeinghaus, M. Sabaj, J. G. Lundberg, J. Armbruster, M. L. Thieme, P. Petry, J. Zuanon, G. T. Vilara, J. Snoeks, C. Ou, W. Rainboth, C. S. Pavanelli, A. Akama, A. v. Soesbergen, and L. Sáenz. 2016. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science **351**:128-129.

Yu, Q., H. Epstein, R. Engstrom, and D. Walker. 2017. Circumpolar arctic tundra biomass and productivity dynamics in response to projected climate change and herbivory. Global Change Biology **23**:3895-3907.

Zhao, M. and S. W. Running. 2010. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. **329**:940-943.