

Les solutions fondées sur la nature

Un levier important pour atténuer le changement climatique à condition d'aller de pair avec une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre

B. Guenet^(1*), J. Le Noë⁽²⁾ et S. Abiven^(1, 3)

- 1) Laboratoire de Géologie, École normale supérieure, CNRS, PSL Univ., IPSL, 24 rue Lhomond 75005 Paris, France
- 2) Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris (CNRS, Sorbonne Université, IRD, INRAE, UPEC, Université Paris-Cité), 4 place Jussieu, 75252 Paris, Cedex 05, France
- 3) CEREEP-Ecotron Ile-de-France, ENS, CNRS, PSL University, Chemin de busseau 11, 77140 Saint-Pierre-lès-Nemours, France

* Auteur correspondant : guenet@biotite.ens.fr

RÉSUMÉ

Le changement climatique en cours réclame des réponses fortes visant principalement à réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais même une réduction drastique ne permettra pas d'atteindre les objectifs fixés par l'accord de Paris d'un réchauffement en dessous des 2 °C au niveau global, a fortiori de 1,5 °C. Cet objectif est encore atteignable si cette réduction impérative des émissions est accompagnée par la mise en place des technologies d'émissions négatives visant à transférer et stocker le dioxyde de carbone de l'atmosphère sous une forme n'affectant pas le climat. Parmi ces technologies on trouve les solutions fondées sur la nature. Dans cet article, nous présentons une partie du portfolio à notre disposition sur les terres émergées en faisant une synthèse de la littérature. Nous présentons leurs potentiels et leurs limites en rappelant l'importance d'une vision intégrée de la gestion des écosystèmes qui se doit d'être multi-objectifs.

Mots-clés

Changement climatique, carbone, solutions fondées sur la nature, écosystème terrestre, atténuation

Comment citer cet article :

Guenet B., Le Noë J. et Abiven S., 2024 - Les solutions fondées sur la nature : un levier important pour atténuer le changement climatique à condition d'aller de pair avec une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre - *Étude et Gestion des Sols*, 31, 75-90

SUMMARY**NATURE-BASED SOLUTIONS: An important lever for mitigating climate change, only if they come with a drastic reduction in greenhouse gas emissions**

Ongoing climate change calls for strong responses, in particular to reduce greenhouse gas emissions. However, even a drastic reduction in greenhouse gas emissions will not enable to achieve the targets set by the Paris Agreement of global warming below 2 °C, a fortiori 1.5°C. This objective is still achievable if the imperative reduction in emissions is accompanied by the implementation of negative emission technologies aiming at transferring and storing the carbon dioxide from the atmosphere into a different form that has no impact on the climate. These technologies include nature-based solutions. In this article, we present part of the available portfolio on land surfaces by summarizing the literature. We present their potential and their limitations, and recall the importance of an integrated vision of ecosystem management, which needs to be multi-objective.

Key-words

Climate change, carbon, nature-based solution, terrestrial ecosystem, attenuation.

RESUMEN**SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA: Una palanca importante para mitigar el cambio climático, sólo si van con una reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero**

El cambio climático en curso exige respuestas contundentes dirigidas principalmente a reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, desafortunadamente ni siquiera una reducción drástica de nuestras emisiones nos permitirá alcanzar los objetivos fijados por el Acuerdo de París de un calentamiento global inferior a 2 °C, o a fortiori a 1,5 °C. Este objetivo aún es alcanzable si la reducción imperativa de las emisiones va acompañada de la introducción de tecnologías de emisiones negativas destinadas a almacenar el carbono en la atmósfera de una forma que no tenga impacto en el clima. Estas tecnologías incluyen soluciones basadas en la naturaleza. Haciendo un resumen bibliográfico, en este artículo presentamos parte de la cartera existente que esta a nuestra disposición que incluye las superficies terrestres, presentamos su potencial, sus limitaciones, y recordamos la importancia de una visión integrada de la gestión de los ecosistemas, que debe ser multiobjetivo.

Palabras clave

Cambio climático, carbono, solución basada en la naturaleza, ecosistema terrestre, mitigación.

1. INTRODUCTION

Le rôle des gaz à effet de serre sur le système climatique est connu depuis le milieu du 19^e siècle grâce aux travaux pionniers de plusieurs scientifiques, notamment Joseph Fourier (Fourier, 1827) et John Tyndall (Tyndall, 1861). Le premier à avoir calculé la sensibilité des températures à la surface de la Terre aux concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂) est le scientifique suédois Svante Arrhenius, prix Nobel de chimie en 1903. Quelques décennies plus tard, dans les années 1930, Guy Stewart Calendar est le premier scientifique à suggérer un possible réchauffement climatique futur dû à l'utilisation excessive de combustibles fossiles et à leur production de gaz à effet de serre, avec des calculs d'une précision spectaculaire malgré plusieurs incertitudes liées au manque de données et de compréhension des rétroactions entre le climat et l'océan, et entre le climat et la biosphère continentale (Anderson *et al.*, 2016). Les scientifiques universitaires n'ont pas été les seuls à s'intéresser aux relations existantes entre la consommation d'énergies fossiles, l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère et le réchauffement climatique : les grandes entreprises, à l'instar d'Elf qui est devenu par la suite Total, ont elles aussi, dès les années 1970, étudié ces relations, bien qu'elles ne les aient reconnues publiquement que bien plus tard au début des années 1990 (Bonneuil *et al.*, 2021).

Deux décennies plus tard, en 1990, est publié le premier rapport du GIEC sur le changement climatique, envoyant ainsi un signal fort quant au consensus scientifique sur ce phénomène global (Houghton *et al.*, 1990). Dès lors, les recherches sur le fonctionnement du système climatique ont tenté d'intégrer de plus en plus les complexités liées aux rétroactions et au couplage des cycles biogéochimiques, tant et si bien qu'un nouveau pan de recherches caractérisées par leurs approches intégratives s'est développé sur le "système-Terre" (Dahan, 2010). Ces progrès des connaissances scientifiques et des incertitudes qui y sont associées donnent lieu à des synthèses de plus en plus volumineuses par le GIEC dont les derniers rapports en date atteignent 7735 pages pour l'ensemble des trois groupes de travail du GIEC (Bases Physiques du changement climatique ; Impacts, adaptations et vulnérabilités du changement climatique ; Atténuation du changement climatique) (Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

Il est maintenant établi que certaines activités humaines, en premier lieu desquelles se trouvent l'utilisation de combustibles fossiles et le changement d'utilisation des terres, affectent les cycles du carbone (C) et de l'azote (N), émettent des particules fines, augmentent les concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre responsables du changement climatique, aux premiers rangs desquels se trouvent le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Dans les années à venir, il est attendu que le changement climatique entraîne une augmentation drastique de la fréquence des événements

extrêmes tels que les tempêtes, les cyclones, les sécheresses ou les feux, pour ne citer que quelques exemples (Ginesta *et al.*, 2022). Le changement climatique ne concerne pas seulement les années et les décennies à venir. L'humanité toute entière — certes à des degrés forts différents selon les contextes géo-sociaux — est déjà confrontée aux changements climatiques avec un réchauffement global d'environ 1 °C depuis le début de l'ère industrielle et avec les quatre dernières décennies qui ont été successivement plus chaudes que celles de toutes les autres décennies depuis le début de l'ère industrielle (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Le réchauffement planétaire de 1 °C pourrait sembler relativement faible par rapport aux variations annuelles de la température, mais cette moyenne mondiale varie fortement localement avec, selon les aires géographiques concernées, des répercussions importantes sur les écosystèmes et les sociétés humaines. De plus, il est observé que l'augmentation actuelle des températures est amplifiée sur les terres émergées avec une augmentation de l'ordre de 1,6 °C (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). L'ensemble de ces impacts sur la biosphère et les sociétés humaines nécessitent des actions rapides et importantes, au premier rang desquelles la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Cette priorité pour la gouvernance globale de l'atténuation du changement climatique a été identifiée depuis la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) de 1992, également connue sous le nom de Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, première d'une longue série de conférences internationales visant à limiter les effets du changement climatique. En 1997, le protocole de Kyoto a été adopté fixant des objectifs clairs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les pays industrialisés de 5,2 % pour la période 2008-2012 par rapport aux émissions de gaz à effet de serre des années 1990. En 2015, la 21^e conférence des parties (COP21) organisée à Paris fixait pour la première fois l'objectif de maintenir le changement climatique en dessous de 2 °C par rapport à la période préindustrielle et de poursuivre l'effort pour limiter autant que possible l'augmentation à 1,5 °C. Pour atteindre ces objectifs, de très importantes réductions des émissions de gaz à effet de serre sont indispensables : les 5 scénarios proposés par le GIEC nous projettent dans un monde avec une augmentation de la température moyenne par rapport à la période préindustrielle comprise entre +1,2 et +5,8 degrés Celsius en 2100, correspondant respectivement à une concentration d'environ à 393 ou 1 135 ppm de CO₂ dans l'atmosphère par rapport aux teneurs actuelles (Meinshausen *et al.*, 2020). Ces chiffres indiquent l'ampleur des changements nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de maintenir l'augmentation de la température en dessous de 1,5 degré, mais ils révèlent aussi que la réduction des émissions de gaz à effet de serre à elle seule n'est pas suffisante. À cet égard, l'importance des solutions fondées sur la nature a été identifiée et, lors de la COP21 à Paris, la plupart des

pays ont intégré des solutions fondées sur la nature dans leurs contributions déterminées au niveau national (c'est-à-dire leurs plans d'actions climatiques visant à réduire les émissions et à s'adapter aux impacts climatiques afin de répondre aux objectifs de l'accord de Paris). Néanmoins, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont continué à augmenter depuis la COP21, en dépit de l'arrêt partiel et temporaire des transports et de l'industrie suite à la crise du COVID19 correspondant à une baisse de 0.4 GtC en 2020 suivi d'un effet de rebond en 2021 (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Dans le sixième rapport d'évaluation publié par le GIEC en 2021, les scénarios futurs compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris tiennent maintenant compte de la possibilité du déploiement de technologies à émissions négatives (également appelées technologies d'élimination du dioxyde de carbone) (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Ces technologies sont définies par leur capacité à retirer du dioxyde de carbone de l'atmosphère et à le stocker sous d'autres formes chimiques dans d'autres réservoirs terrestres ou océaniques, avec des temps de résidence de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à celui du CO₂ atmosphérique. Sous cette dénomination co-existent des techniques ou technologies très diverses, avec des niveaux de complexités, d'incertitudes et d'intégration dans les écosystèmes très variés.

Les solutions fondées sur la nature, et en particulier les solutions climatiques fondées sur la nature, font partie de ces techniques d'élimination du dioxyde de carbone. D'une manière très générale, les solutions fondées sur la nature peuvent être définies comme des « actions fondées sur la nature et visant à relever des défis sociétaux » (Hanson *et al.*, 2020). Plus précisément, l'idée originale des solutions fondées sur la nature est que l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à celui-ci devraient être fondées sur une compréhension approfondie du fonctionnement des écosystèmes à des échelles spatiales bien définies, afin d'améliorer la productivité des sols, la qualité de l'air et de l'eau et de promouvoir les puits de carbone dans les sols et la biomasse (Griscom *et al.*, 2017 ; Girardin *et al.*, 2021). Cette définition étant très générale, l'un des objectifs du présent article est précisément d'illustrer concrètement ce concept en présentant une partie du portfolio des solutions fondées sur la nature dans ce qui suit l'introduction. Outre les solutions fondées sur la nature, d'autres types très différents de techniques d'élimination du dioxyde de carbone sont regroupés sous cette terminologie d'élimination du CO₂, ce qui peut prêter à confusion, voire poser problème (Figure 1). Par exemple, les techniques de captage direct dans l'air avec stockage du carbone visent à fixer le CO₂ de l'atmosphère au moyen de réactions chimiques, puis à le stocker dans le sous-sol. Il s'agit typiquement d'une technique d'élimination du dioxyde de carbone qui ne repose pas sur la stimulation de certains mécanismes ou processus liés au fonctionnement biogéochimique des écosystèmes. L'impact sur les écosystèmes est très difficile à

évaluer et à prédire. En effet, ces techniques visant à stocker des quantités importantes de carbone sur des délais courts sont susceptibles d'engendrer des rétroactions importantes si ces solutions de stockage se révèlent instables sur la durée (Russell *et al.*, 2012). L'ensemble des différentes techniques d'élimination du dioxyde de carbone constituent elles-mêmes un sous-groupe de l'ensemble des méthodes de manipulation du climat appelées géo-ingénierie (Figure 1). Le principe d'action de la géo-ingénierie est la manipulation de certains moteurs du système climatique pour réduire le réchauffement de la planète, dont l'élimination du CO₂ atmosphérique comme mentionné ci-dessus. Mais la géo-ingénierie englobe d'autres méthodes telles que la modification du rayonnement solaire (Shepherd, 2012). Cela peut être fait en modifiant l'atmosphère et l'albédo de la surface de la Terre en utilisant par exemple des injections d'aérosols stratosphériques. Les aérosols se comportent comme de petits miroirs reflétant les radiations solaires, ce qui devrait, en théorie, refroidir la Terre. Néanmoins, ces techniques de manipulation du rayonnement solaire sont fortement critiquées en raison des risques importants et non maîtrisés d'effets secondaires sur le système climatique et sur la santé humaine. Dans cet article, nous ne discuterons pas de toutes les options de géo-ingénierie mais nous nous concentrerons sur les technologies à émissions négatives et en particulier sur les solutions fondées sur la nature terrestre.

2. QUELLES SONT LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE ?

Les solutions fondées sur la nature peuvent avoir différentes définitions (Wild *et al.*, 2020 ; UICN) Quelle que soit la définition, l'idée maîtresse est de résoudre des problèmes environnementaux grâce à une bonne compréhension du fonctionnement des écosystèmes, anthropisés ou non, et, à terme, de favoriser l'expression des services écosystémiques qu'ils remplissent. Dans cet article de synthèse, notre attention se porte tout particulièrement sur le service d'atténuation du changement climatique. Celui-ci est parfois considéré comme une sous-catégorie des solutions fondées sur la nature, appelées solutions climatiques fondées sur la nature. Selon Girardin *et al.* (2021), les solutions fondées sur la nature visant spécifiquement l'atténuation du changement climatique ont pour objectif de (i) protéger les écosystèmes pour éviter les émissions de C, principalement en évitant la déforestation ; (ii) restaurer les écosystèmes dégradés pour promouvoir les puits de C (par exemple, en réduisant la récolte de bois ou le surpâturage dû à une forte densité de bétail) ; et (iii) mettre en œuvre les meilleures pratiques de gestion pour réduire les émissions de GES des forêts, des terres cultivées et des prairies et promouvoir la séquestration du carbone. Il est donc important de noter que l'amplification des mécanismes pilotant le stockage de

Figure 1 : Schéma présentant les principales techniques de géoingénierie

Figure 1: Diagram showing the main geoengineering techniques



carbone dans les écosystèmes nécessite, dans la plupart des cas, une gestion active de ces écosystèmes, qu'il s'agisse de forêts, de champs cultivés ou de prairies. La recherche insiste également sur le fait que les solutions fondées sur la nature doivent être conçues pour la longévité, compte tenu du potentiel de puits de carbone à long terme des écosystèmes terrestres. Nous présentons ci-après les principales solutions climatiques fondées sur la nature, avec toutefois une focale principale sur les écosystèmes terrestres. Certaines solutions climatiques fondées sur la nature peuvent être déployées sur les océans, ces solutions ne relevant pas de notre domaine d'expertise, nous ne les présentons pas dans cet article mais renvoyons aux synthèses déjà existantes (Riisager-Simonsen *et al.*, 2022 ; O'Leary *et al.*, 2023).

3. LES SOLS AUX FONDATIONS DES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE DANS LES TERRES ÉMERGÉES

L'une des principales solutions fondées sur la nature consiste à augmenter les stocks de carbone organique dans les sols. Dans les sols, le carbone se trouve principalement sous forme d'un assemblage complexe de molécules organiques relativement simple dont le temps de résidence varie de quelques heures à plusieurs millénaires (Chen *et al.*, 2020). Sous forme de molécules organiques du sol, autrefois désignées par le terme humus, le carbone ne se trouve plus dans l'atmosphère et, ainsi, ne contribue pas à l'effet de serre. Le carbone organique du sol stocké dans les sols minéraux (par opposition aux sols organiques que sont par exemple les tourbes et les marécages) est d'environ 2000 PgC, ce qui représente à peu près trois fois la quantité de carbone présent dans l'atmosphère (Scharlemann *et al.*, 2014). Dans le cycle global du carbone, les sols peuvent donc être appréhendés comme un réservoir dans lequel entrent et sortent des flux de carbone.

Les entrées proviennent des plantes qui fixent le carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse. Une fraction de ce carbone fixé est respirée par les plantes tandis qu'une autre partie est transformée en biomasse. Au cours de l'année, une partie de la biomasse tombe ou se retrouve dans les sols en raison de la phénologie normale des plantes (les feuilles tombent en automne, une partie des racines meurent ou produisent des exsudats permettant d'accélérer la solubilisation des nutriments du sol), et de l'activité humaine de récolte dans les agro-écosystèmes et d'exploitation des forêts, laissant au sol des résidus de récolte des plantes cultivées ou d'abattage du bois. Le carbone contenu dans la biomasse apportée au sol peut ensuite être utilisé comme substrat par la faune, les bactéries et les champignons vivant dans le sol. La consommation de matière organique par les micro-organismes du sol se répartit entre d'une part le métabolisme énergétique, *i.e.*, la décomposition

des glucides en dioxyde de carbone permettant de libérer de l'énergie pour le fonctionnement du métabolisme, et d'autre part la biosynthèse, *i.e.*, l'utilisation du carbone consommé pour la synthèse de protéines, et le stockage de réserve lipidique et glucidique constituant la biomasse microbienne. Le ratio entre carbone biosynthétisé par les micro-organismes et carbone consommé indique l'efficacité d'utilisation du carbone par les micro-organismes ; plus cette efficacité est élevée, plus les flux de CO₂ par la respiration sont faibles, et plus l'accumulation du carbone dans les sols est importante (Manzoni *et al.*, 2012). Toutefois, une partie des apports de carbone organique par la biomasse peut ne pas être décomposée par les micro-organismes, soit en raison d'une barrière énergétique trop élevée (l'énergie somatique nécessaire pour dégrader le carbone des sols est trop élevée par rapport aux gains d'énergie pour le métabolisme), soit en raison de l'occlusion de la matière organique dans des micro-agrégats et/ou de l'interaction avec des complexes argilo-minéraux rendant cette source de carbone inaccessible. De même, une fois que les micro-organismes meurent, leur biomasse s'accumule et contribue à la formation du stock de matière organique des sols. Cette biomasse microbienne morte peut elle-même être décomposée par d'autres micro-organismes vivants ou bien demeure protégée des attaques microbiennes pendant des décennies, voire des millénaires, grâce aux différents mécanismes de stabilisation de carbone organique des sols susmentionnés.

L'analyse de la stœchiométrie des éléments carbone, azote, phosphore et soufre de la matière organique des sols révèle que celle-ci est beaucoup plus proche de celle des bactéries et champignons que de celle des plantes, indiquant ainsi que l'essentiel du carbone organique des sols provient directement de l'accumulation de biomasses mortes de bactéries et champignons (Tipping *et al.*, 2016). Ainsi, une connaissance approfondie des mécanismes biogéochimiques régulant l'efficacité d'utilisation du carbone par les micro-organismes et des processus de stabilisation des biomasses microbiennes mortes peut permettre d'identifier les pratiques de gestion des sols favorisant ces mécanismes et processus afin d'augmenter le stockage du carbone dans les sols en ralentissant les flux de sortie du carbone des sols.

Néanmoins, réduire les flux de sortie en pilotant les activités microbiennes reste un défi délicat à relever pour deux raisons principales. Premièrement, le fonctionnement des communautés microbiennes n'est pas parfaitement compris (Cavicchioli *et al.*, 2019). La diversité microbienne est immense et encore largement méconnue, et les interactions entre différentes communautés microbiennes sont complexes. Par exemple, Benning et Moeller (2021) ont montré que des apports externes de microorganismes à un sol pouvaient avoir des effets mutualistes ou antagonistes selon les conditions environnementales. Deuxièmement, les activités microbiennes libèrent du CO₂ mais aussi des nutriments minéraux qui sont ensuite disponibles pour les plantes. Ainsi, la

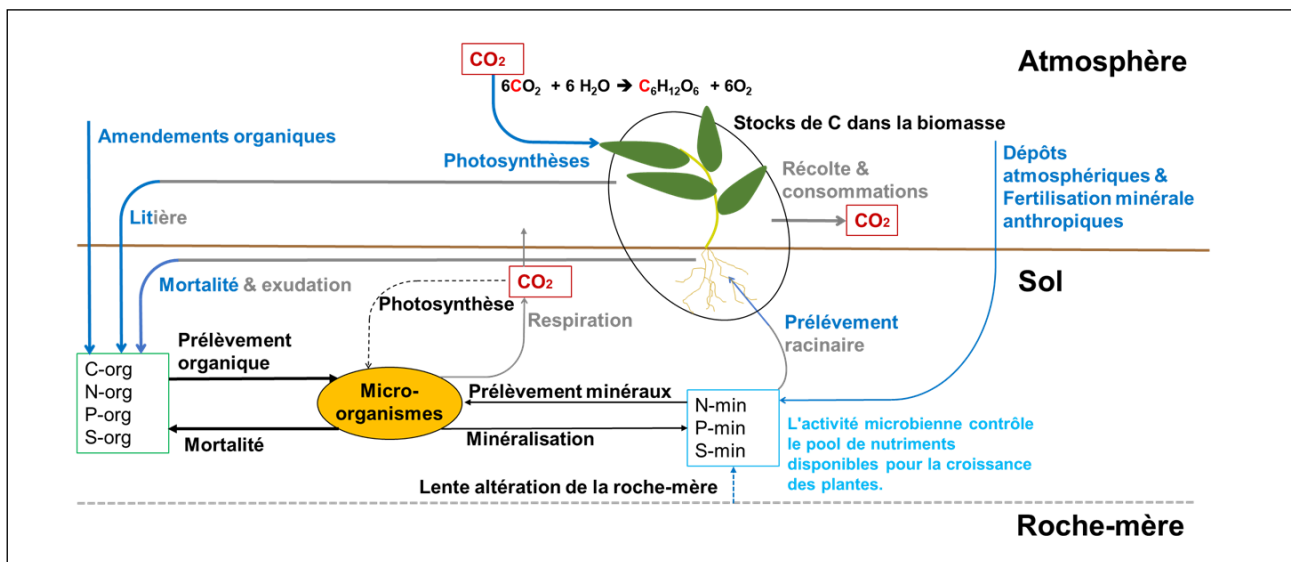
réduction de l'activité microbienne est susceptible d'entraîner une réduction de la disponibilité des nutriments du sol, ralentissant la croissance des plantes, et par voie de conséquence une diminution de la fixation photosynthétique du carbone par les plantes et des apports de carbone aux sols (Figure 2). Étant donné que le bilan carbone des sols résulte de l'équilibre entre entrées et sorties, la diminution des sorties de carbone par le ralentissement de l'activité microbienne doit rester supérieure à une possible diminution des apports de carbone par la biomasse pour un stockage du carbone effectif. Néanmoins, une façon de réduire les sorties de carbone des sols est de jouer sur les flux latéraux et notamment de réduire les pertes liées à l'érosion (Naipal *et al.*, 2018) mais il est important de noter que les flux sortant de matières organiques liées à l'érosion s'associent à des dépôts dans des zones plus ou moins proches et peuvent également être transportés jusqu'aux systèmes aquatiques et y sédimenter, ce qui peut représenter un stockage net de carbone à l'échelle du bassin versant (Van Oost *et al.*, 2007).

Puisque le stockage du carbone dans les sols résulte de cet équilibre entrées-sorties, on peut donc prendre le problème dans l'autre sens et chercher à augmenter les apports de biomasses végétales et des autres matières organiques exogènes (*e.g.*, fumiers, composts, boues urbaines) aux sols en modifiant les pratiques d'usages des sols. Néanmoins, cette option ne représente un stockage net de C que si l'activité photosynthétique augmente également. En effet, l'amendement de matières organiques exogènes issues d'une photosynthèse antérieure peut être vu comme un flux latéral de carbone (d'une localité à une autre) et non comme un flux vertical qui irait de l'atmosphère aux sols. Enfin, ces apports peuvent également entraîner des rétroactions négatives sur la décomposition du carbone des sols : les apports de matières organiques fraîches peuvent en effet stimuler l'activité microbienne et rendre accessible des matières organiques qui étaient stabilisées. Il s'agit d'un phénomène que l'on a appelé "priming effect" (Bernard *et al.*, 2022). Toutefois, de très nombreuses études de la dynamique du carbone organique des sols fondées sur des essais aux champs longue durée ont montré qu'à l'échelle de la dizaine d'années, l'augmentation des apports de carbone aux sols entraîne systématiquement une augmentation des stocks de carbone organique dans les sols jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint (Sleutel *et al.*, 2006 ; Zhang *et al.*, 2010 ; Autret *et al.*, 2016).

En comparaison d'une limitation des sorties de carbone, l'augmentation des apports de biomasse pour stocker du carbone dans les sols semble donc être une option plus réaliste et plus simple à mettre en œuvre, également promue par plusieurs initiatives internationales. À cet égard, l'initiative 4‰, lancée au moment de la COP 21, constitue un cas emblématique de programme international regroupant des gouvernements, des ONG et des partenaires du secteur privé pour promouvoir le stockage du carbone dans les sols. Elle repose sur l'idée

Figure 2 : Dynamique du carbone et des nutriments à l'interface sol-plante-atmosphère. Les flèches bleues représentent les entrées dans la biomasse et les sols, les flèches grises représentent les sorties de la biomasse et des sols, les flèches noires représentent le recyclage du carbone et des nutriments dans les sols. Certaines flèches sont à la fois grises et bleues car les sorties de la biomasse correspondent aux entrées dans les sols et vice-versa (par exemple, la litière, l'absorption des nutriments par les racines). Le puits net de carbone dans le sol et la biomasse résulte de l'équilibre entre les entrées et les sorties de carbone, un équilibre positif entraînant un retrait net de carbone de l'atmosphère et un équilibre négatif entraînant une accumulation nette de CO₂ dans l'atmosphère. D'autres nutriments tels que l'azote, le phosphore et le soufre sont des éléments clés qui contrôlent l'efficacité de l'utilisation du carbone par les micro-organismes et la croissance des plantes, rétroagissant ainsi sur le bilan carbone dans les sols et la biomasse. Il convient de noter qu'un bilan carbone rigoureux doit également inclure les entrées et sorties de carbone dans les produits manufacturés à base de biomasse, tels que les meubles en bois. Par souci de simplicité, on suppose ici que les stocks de carbone dans ces produits manufacturés sont en équilibre, de sorte que les sorties de carbone par la récolte peuvent être considérées comme des émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

Figure 2: Carbon and nutrient dynamics at the soil-plant-atmosphere interface. The blue arrows represent inputs to biomass and soils, the grey arrows represent outputs from biomass and soils, and the black arrows represent the recycling of carbon and nutrients in soils. Some arrows are both grey and blue because biomass outputs correspond to soil inputs and vice versa (e.g. litter, nutrient uptake by roots). The net carbon sink in the soil and biomass results from the balance between carbon inputs and outputs, with a positive balance leading to a net removal of carbon from the atmosphere and a negative balance leading to a net accumulation of CO₂ in the atmosphere. Other nutrients such as nitrogen, phosphorus and sulphur are key elements that control the efficiency of carbon use by micro-organisms and plant growth, thus feeding back into the carbon balance in soils and biomass. It should be noted that a rigorous carbon balance should also include the carbon inputs and outputs of biomass-based manufactured products, such as wooden furniture. For the sake of simplicity, it is assumed here that the carbon stocks in these manufactured products are in equilibrium, so that carbon outflows through harvesting can be considered as CO₂ emissions into the atmosphere.



qu'une augmentation de 4 % des stocks de carbone des sols chaque année permettrait de compenser intégralement les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Bien que très séduisante, cette idée souffre de plusieurs défauts et le chiffre de 4 % ne doit pas être considéré comme un objectif comptable mais plutôt comme un principe d'action. En effet, l'augmentation des apports de carbone aux sols n'est pertinente que sur des terres déjà aménagées par les sociétés humaines, comme les terres cultivées ou certaines prairies et forêts gérées. Ainsi, si l'on considère uniquement les écosystèmes terrestres

anthropisés, le potentiel de compensation des émissions de l'initiative 4% ne serait que de 20 à 35 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine (Minasny *et al.*, 2017). En outre, cette estimation ne prend pas en compte d'autres limitations biophysiques pour augmenter les apports végétaux, comme la disponibilité des nutriments ni des limitations socio-économiques notamment liées à l'acceptation et au financement de nouvelles pratiques agricoles (Smith *et al.*, 2016). Qui plus est, laissant de côté ces autres limitations, l'augmentation nécessaire des apports de biomasse végétale pour atteindre

l'objectif de 4 % est considérable. Des estimations récentes pour la France et l'Allemagne indiquent qu'une augmentation entre 40 et 213 % des apports végétaux serait nécessaire pour atteindre un tel objectif (Bruni *et al.*, 2021 ; Martin *et al.*, 2021 ; Riggers *et al.*, 2021).

Le potentiel de compensation des émissions de gaz à effet de serre par le stockage de carbone dans les sols est donc limité et ne saurait être une solution suffisante pour atténuer le changement climatique. Toutefois, il s'agit d'une solution comportant d'autres bénéfices et, sauf erreur de notre part, aucun inconvénient notable n'est associé au stockage du carbone dans les sols. Bien au contraire, l'augmentation du stock de carbone organique du sol est souvent associée à une amélioration des propriétés du sol telles que la capacité de rétention d'eau, la fertilité et la biodiversité des sols. Ainsi, sans être la panacée, le stockage du carbone dans le sol doit être considéré comme une solution gagnant-gagnant.

4. PEUT-ON PRODUIRE DES ALIMENTS ET STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES ?

Une question importante qui se pose avec le stockage de C dans les sols est de déterminer comment les changements de pratiques associées aux systèmes agricoles peuvent affecter la sécurité alimentaire. Une approche intéressante à étudier est le cas du biochar car ses effets sur la production agricole sont complexes. Le biochar consiste à transformer une biomasse d'origine végétale en un produit similaire au charbon de bois. La biomasse est pyrolysée (chauffée entre 350 et 900 degrés Celsius sous une atmosphère sans oxygène), ce qui modifie en profondeur sa composition chimique. Sa structure chimique devient fortement aromatique (McBeath et Smernik, 2009), ce qui la rend difficile à décomposer pour les micro-organismes. Ce matériel possède également des surfaces réactives qui se lient fortement avec les surfaces minérales, réduisant ainsi son accessibilité aux micro-organismes (Singh *et al.*, 2014). Ce matériau est ensuite apporté aux sols agricoles ou à d'autres matrices (le biochar a été ajouté aux matériaux de construction, aux unités de traitement des eaux usées, à l'alimentation du bétail) où sa résistance à la dégradation microbienne permet un stockage du carbone sur des siècles, voire des millénaires (Singh *et al.*, 2012). Outre ces capacités de stockage du carbone, il a été démontré que le biochar modifie, principalement de manière positive (mais pas systématiquement), les propriétés des écosystèmes comme la fertilité et la résilience des sols, la remédiation à la pollution, le traitement des déchets organiques, ou encore la production d'énergie, pour ne citer que quelques exemples. L'efficacité du biochar à stocker le carbone à long terme ainsi que ses co-bénéfices ont attiré l'attention sur son application à grande échelle, avec quelques réussites, mais

aussi des problèmes de rétroaction potentiellement importants et encore mal connus.

La capacité du biochar à stocker efficacement du carbone à long terme repose sur l'équilibre entre la quantité de carbone perdu dans l'atmosphère et la quantité et la durée de stockage de la matière organique dans l'écosystème. Au cours du processus de pyrolyse, une grande partie du carbone est perdue, car le carbone et l'oxygène présents dans la matière organique réagissent et forment du CO₂ tant que la source d'oxygène n'est pas épuisée. Cela représente généralement plus de 50 % de la matière organique. Si l'on veut obtenir un bilan de masse positif du carbone lors de la production de biochar, cela signifie que le matériau charbonneux restant doit rester beaucoup plus longtemps dans l'environnement pour compenser les pertes survenant lors de la pyrolyse, ce qui se produit généralement après plusieurs années, voire quelques décennies (Woolf *et al.*, 2010). C'est pourquoi il est essentiel de comprendre le temps de résidence du biochar dans l'environnement (c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le matériau soit transformé en CO₂ ou CH₄) pour évaluer son efficacité. Malheureusement, les connaissances scientifiques à ce sujet restent encore relativement limitées. Sur la base des connaissances actuelles, l'application du biochar semble être efficace pour stocker une grande quantité de carbone, sans que l'on puisse dire avec précision pour combien de temps et avec quelles conséquences à long terme sur les agro-écosystèmes (Schmidt *et al.*, 2021).

L'applicabilité de l'approche du biochar n'est en fait que peu liée à sa capacité à stocker du carbone. Pour que le charbon soit un amendement organique attractif pour les agriculteurs, l'impact sur les fonctions agronomiques est très probablement le facteur le plus décisif. C'est un sujet de recherche actuel, avec des observations positives globalement significatives, mais il semble que l'adéquation entre le biochar, la plante, le sol et le territoire soit la clé du succès pour l'adoption de cette pratique par les agriculteurs (Müller *et al.*, 2019). Cette adéquation, en particulier l'importance de prendre en compte le contexte socio-économique de la production agricole, est peu étudiée, et représente donc un obstacle important aux développements futurs (Bellè *et al.*, 2022). Par exemple, la disponibilité du matériel organique initial et son adéquation avec les besoins locaux des agriculteurs constituent un point clé de son acceptation : le minerai organique se doit d'être disponible, en quantité importante, localement, pour éviter de transporter de la biomasse, ne pas entrer en concurrence avec d'autres applications comme le compost ou le bioénergie, dont les filières sont déjà installées, ou encore être facilement pyrolysable, notamment avoir une teneur en matière sèche relativement haute. Enfin la biomasse finale doit produire un biochar aux propriétés adaptées aux besoins locaux. Dans des pays en zone tempérée comme la France métropolitaine, cette conjonction de conditions est au final assez rare.

Le biochar peut être considéré comme se situant à la limite entre les solutions fondées sur la compréhension du fonctionnement des écosystèmes et les approches plus axées sur la technologie. En effet, le biochar est chimiquement similaire à la matière organique produite pendant les feux de forêt, ce charbon « naturel » représentant une très grande partie de la matière organique sur Terre (en moyenne 14 % du carbone du sol (Reisser *et al.*, 2016), 10 % des sédiments marins, environ 10 % du carbone dans les eaux marines (Coppola *et al.*, 2018)). Cette matière organique dérivée du feu a un temps de persistance très long dans les écosystèmes, et joue un rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème. Cependant, la production de biochar peut aussi être considérée comme un détournement de la biomasse qui serait naturellement retournée au sol par des moyens moins artificiels, avec notamment l'interférence de la technologie (pyrolyseur) et l'éventuel transfert de matière pyrolysée d'une région à l'autre.

Un autre exemple intéressant à étudier est l'agroforesterie. Tout d'abord il est important de noter que sous le terme agroforesterie se cache en réalité un nombre de situations très diverses et parfois peu comparables (Feliciano *et al.*, 2018). Ici nous utiliserons une définition large telle que celle donnée par Feliciano *et al.* (2018) qui considèrent les systèmes agroforestiers comme des agrosystèmes avec la présence d'arbres sur les frontières externes et internes, sur les terres cultivées ou sur toute autre niche de terre agricole disponible et qui peuvent à la fois atténuer le changement climatique et fournir de la nourriture. Il semblerait que pour stocker du C l'agroforesterie soit un système de gestion de terres performant (Kim *et al.*, 2016). En effet, la présence d'arbres permet le développement d'une bande enherbée aux pieds des arbres. Cette bande est très productive, ce qui induit une augmentation des apports de C dans les sols agricoles et favorise ainsi le stockage du carbone dans les sols agricoles (Cardinael *et al.*, 2018). Néanmoins, la mise en place de l'agroforesterie peut avoir des conséquences négatives sur les rendements agricoles, principalement *via* deux effets. Tout d'abord, mécaniquement pour pouvoir planter des arbres, une réduction de la surface cultivée est nécessaire. La production par hectare est donc mécaniquement amputée de la surface dédiée aux arbres. D'autre part, l'ombre faite par les arbres au cours de leur croissance peut réduire l'activité photosynthétique des plantes cultivées à cause d'une compétition pour la lumière. Néanmoins, l'association de certaines espèces d'arbres avec certaines espèces de plantes à intérêt agronomique peut parfois permettre d'augmenter les rendements à l'hectare. En effet, Pardon *et al.* (2018) suggèrent d'associer plutôt des cultures d'hiver avec des arbres pour l'agroforesterie en Europe afin de limiter la compétition pour la lumière. Mais l'agroforesterie peut également avoir d'autres effets intéressants sur les écosystèmes en réduisant par exemple la lixiviation de l'azote (Zhu *et al.*, 2019). La mise en place d'une solution fondée sur la nature type agroforesterie demande donc une approche holistique

du système de production prenant en compte l'ensemble des effets directs et indirects sur l'environnement, sur la sécurité alimentaire et sur les revenus des agriculteurs. Cette vision holistique pourrait s'appliquer à n'importe quel autre changement de pratiques tel que la réduction du travail du sol ou l'utilisation de couverts intermédiaires.

5. GESTION DES FORÊTS ET CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES

Les forêts jouent un rôle essentiel dans le cycle global du carbone, en échangeant annuellement avec l'atmosphère cinq fois les émissions anthropiques de CO₂ (Anderson-Teixeira *et al.*, 2018). Ainsi, les solutions fondées sur les forêts font partie des solutions fondées sur la nature les plus prometteuses pour atténuer le changement climatique en éliminant le CO₂ atmosphérique et en le stockant de façon pérenne dans les sols et la biomasse forestière. Cependant, la mise en œuvre de solutions fondées sur les forêts nécessite une bonne compréhension non seulement du fonctionnement des écosystèmes forestiers, mais aussi des processus socio-écologiques impliqués dans l'utilisation et la gestion des forêts. En effet, une comptabilisation rigoureuse de l'élimination nette de carbone par les solutions forestières doit tenir compte de ce qui suit : (i) le puits net de carbone dans les sols et la biomasse favorisé par les solutions forestières ; (ii) les émissions cachées du puits net de carbone forestier, c'est-à-dire les émissions de carbone induites par les processus socio-écologiques qui ont permis ou entraîné des changements dans l'utilisation des ressources forestières (Gingrich *et al.*, 2019) ; (iii) les « coûts d'opportunité » ou « puits non réalisés », c'est-à-dire la différence entre le puits de carbone net réel et le puits de carbone potentiel dans les écosystèmes (Searchinger *et al.*, 2018 ; Marques *et al.*, 2019) ; (iv) les émissions de carbone évitées grâce au remplacement de produits à forte intensité d'émissions par des produits renouvelables à base de biomasse. Ainsi, un périmètre élargi de comptabilisation du bilan carbone lié aux solutions fondées sur les forêts est essentiel pour prendre en compte les compromis entre, d'une part le puits net de carbone dans l'écosystème terrestre et les émissions cachées engendrées par les processus ayant rendus possibles ces puits, et d'autre part entre les puits de carbone non réalisés et les émissions de carbone évitées (*Figure 2*). Ici nous présentons la difficulté de prendre en compte les émissions cachées dans le cadre de la gestion forestière mais il est important de noter que les émissions cachées ne sont pas uniquement liées à la forêt et une comptabilité précise est indispensable pour toutes les technologies à émissions négatives.

Compromis entre le puits net de carbone dans les écosystèmes terrestres et les émissions cachées

Le puits de carbone net dans les écosystèmes forestiers peut être déterminé par divers processus, à savoir le boisement et l'accroissement de la biomasse rendus possibles par une pression de récolte moindre ou des conditions environnementales de croissance plus favorables (par exemple, une saison de croissance plus longue, une fertilisation du sol par les nutriments limitants) (Kauppi *et al.*, 2020), un phénomène également connu sous le nom de « transition forestière » (Mather, 1992; Gingrich *et al.*, 2019). Ce phénomène est, lui-même, le résultat d'autres processus socio-écologiques qui entraînent des changements dans l'approvisionnement en biomasse forestière en relation avec les changements d'affectation des terres. Des recherches sur les dynamiques socio-écologiques à long terme ont révélé que la « transition forestière » était le plus souvent rendue possible par (i) l'intensification de l'agriculture libérant de l'espace pour le boisement, (ii) l'abandon de l'alimentation du bétail par la litière forestière au profit de cultures et d'aliments importés et (iii) le remplacement du bois de chauffage par des combustibles fossiles atténuant la pression sur la récolte de la biomasse forestière (Le Noë *et al.*, 2020; Gingrich *et al.*, 2021; Magerl *et al.*, 2022). Toutefois, ces processus socio-écologiques sont eux-mêmes associés à des émissions de gaz à effet de serre, par exemple, pour la production d'engrais, le transport de biomasse et l'utilisation de combustibles fossiles. De sorte que le puits de carbone apparent dans les écosystèmes forestiers peut, en réalité, n'être qu'une faible compensation du passage des sociétés humaines d'un métabolisme énergétique organique, reposant essentiellement sur l'exploitation du sol, à un métabolisme énergétique fossile, reposant essentiellement sur l'exploitation du sous-sol (Gingrich *et al.*, 2007; Le Noë *et al.*, 2021). Ainsi, une étude sur le puits de carbone observé dans les forêts françaises depuis le milieu du 19^e siècle a mis en lumière que ce puits est du même ordre de grandeur que l'augmentation du bilan de gaz à effet de serre par l'agriculture dont l'intensification est l'un de facteurs ayant rendu possible l'accroissement des surfaces de forêts tandis que la densification de la biomasse forestière a été concomitante d'un recours croissant aux énergies fossiles, relâchant ainsi la pression sur la récolte du bois-énergie (Le Noë *et al.*, 2020).

Une action publique qui ambitionne un meilleur stockage de carbone dans les forêts doit aussi considérer l'ensemble des conséquences sur d'autres services écosystémiques

La gestion forestière, la reforestation et l'afforestation de terres n'étant pas ou plus boisées sont souvent proposées comme une solution efficace pour stocker des quantités importantes de carbone (Forster *et al.*, 2021). Néanmoins, il est important de considérer les potentiels impacts sur d'autres fonctions de l'écosystème. Tout d'abord, une politique s'intéressant uniquement au stock de carbone peut induire des changements d'autres paramètres notamment biophysiques comme l'albedo qui peuvent avoir un effet réchauffant (Naudts *et al.*, 2016; Luysaert *et al.*, 2018) qui contrebalance l'effet du stockage de carbone. L'effet net des actions de gestion pourrait donc avoir un effet opposé à celui escompté. De plus, une gestion forestière ayant pour unique objectif de stocker du carbone pourrait tendre vers une diminution des niches écologiques et ainsi impacter négativement la biodiversité (Gamfeldt *et al.*, 2013) allant à l'encontre d'autres engagements internationaux (Paoli *et al.*, 2010).

6. L'UTILISATION DE LA BIOMASSE COMME SOURCE D'ÉNERGIE PEUT-ELLE ÊTRE UNE SOLUTION FONDÉE SUR LA NATURE ? COMPROMIS ENTRE LES COÛTS D'OPPORTUNITÉ DU CARBONE ET LES ÉMISSIONS DE CARBONE ÉVITÉES

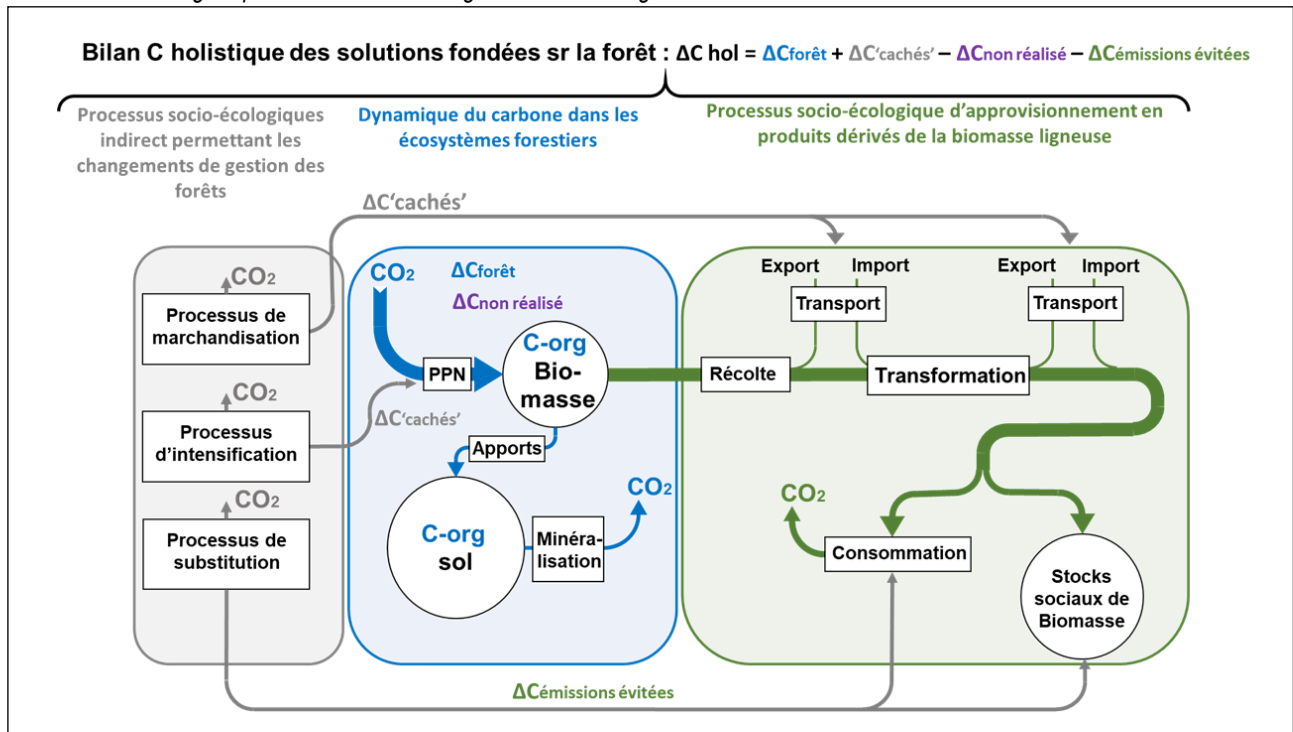
Considérer les produits issus de la biomasse comme neutres en carbone fait l'objet d'un débat scientifique intense (Ter-Mikaelian *et al.*, 2015; Erb *et al.*, 2022). En effet, les stratégies qui s'appuient sur une utilisation accrue des produits issus de la biomasse pour « décarboner » l'économie négligent souvent le fait que, même lorsque l'extraction de carbone par la récolte est compensée par une repousse égale de la biomasse sur une période d'un an, les émissions de carbone évitées par la substitution de produits à forte intensité d'émissions par des produits dérivés de la biomasse ligneuse pourraient être beaucoup plus faibles que la perte associée au puits de carbone potentiel en l'absence d'exploitation des écosystèmes forestiers (Erb *et al.*, 2022). Par exemple, les solutions forestières reposant sur une utilisation accrue de la bioénergie pour remplacer les combustibles fossiles pourraient avoir un bilan carbone moins bon que les solutions fondées sur la nature favorisant la

restauration des forêts et donc l'accumulation de carbone par la re-densification de la biomasse et l'augmentation des apports de litière. De manière similaire, les autres usages du bois ayant un temps de demi-vie élevé (par exemple les charpentes de toit ou les ameublements) peuvent permettre de stocker plus de carbone que ce que la substitution des énergies fossiles par le bois énergie permet d'éviter comme émission de CO₂. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'utilisation de la bioénergie conduit à une source de carbone provenant des écosystèmes terrestres (par exemple, suite à des récoltes de bois non durables, c'est-à-dire lorsque le prélèvement annuel est plus important que la repousse annuelle). Ainsi, le puits de carbone non réalisé est encore plus important que dans le cas d'un puits de carbone net de l'écosystème lorsque les récoltes de bois sont durables et donc avec un prélèvement plus faible que la repousse annuelle. En outre, le recours au bois-énergie et, plus généralement, aux bioénergies (incluant ici les cultures énergétiques) peut parfois être une fausse bonne idée. En effet, des travaux d'histoire sur les transitions énergétiques des 19^e et 20^e siècles ont montré que les transitions énergétiques procèdent rarement par substitutions

mais presque toujours par additions (Fressoz, 2022). C'est-à-dire que la mise sur le marché d'une nouvelle source d'énergie ne va pas éliminer du marché une autre source jugée obsolète mais elle va s'ajouter aux sources déjà proposées sur le marché. Du côté des cultures énergétiques, d'autres travaux ont mis en lumière leur antagonisme avec la production vivrière, en particulier dans les pays des Suds et leur rôle négatif dans la crise alimentaire de 2007-2008 (Moore, 2010). Ainsi, pour que les bio-énergies puissent constituer une solution fondée sur la nature, encore faut-il qu'elles se substituent réellement à la combustion d'énergies fossiles et ne s'y ajoutent pas et qu'elles n'entraînent pas d'insécurité alimentaire. Face à ce type de tension, une solution gagnant-gagnant consisterait à restaurer les forêts jusqu'à ce qu'elles atteignent un optimum entre (i) leur production primaire nette annuelle maximale disponible pour le bois-énergie se substituant effectivement aux combustibles fossiles et (ii) le stock maximal de C dans la biomasse et les sols forestiers.

Figure 3 : L'estimation du potentiel des solutions fondées sur les forêts pour éliminer le carbone de l'atmosphère nécessite l'adoption d'une approche socio-écologique prenant en compte les compromis entre les services écosystémiques de régulation et d'approvisionnement, ainsi que les processus socio-écologiques indirects à l'origine des changements de gestion forestière et d'utilisation des terres.

Figure 3 : Estimating the potential of forest-based solutions to remove carbon from the atmosphere requires the adoption of a socio-ecological approach that takes into account the trade-offs between regulating and provisioning ecosystem services, as well as the indirect socio-ecological processes behind changes in forest management and land use.



7. PRÉSERVATION ET RESTAURATION DES ÉCOSYSTÈMES NATURELS

Comme nous l'avons écrit plus haut, la gestion forestière peut aider à favoriser le stockage de carbone dans les écosystèmes. Cependant, il est utile de rappeler que lorsqu'il reste des forêts primaires, c'est-à-dire des forêts qui n'ont jamais été gérées par l'activité anthropique, la meilleure solution forestière est toujours de les préserver (Erb *et al.*, 2022). En effet, les forêts primaires restantes sont actuellement très menacées : la conservation de ces forêts est de la plus haute importance face à la crise du climat et de la biodiversité (Potapov *et al.*, 2017 ; Goldstein *et al.*, 2020). Ces forêts primaires contiennent des densités de carbone accumulées nettement plus importantes que les forêts secondaires, y compris les forêts gérées (Luyssaert *et al.*, 2008 ; Erb *et al.*, 2018 ; Le Noë *et al.*, 2021), de sorte que l'exploitation de ces forêts entraîne inéluctablement des émissions nettes de C dans l'atmosphère, même en tenant compte des stocks de carbone dans les produits de biomasse manufacturés (Keith *et al.*, 2015 ; Hudiburg *et al.*, 2019).

D'autres écosystèmes stockent naturellement du carbone mais sont actuellement menacés par les pressions anthropiques comme les zones humides, les savanes et les tourbières. Par exemple, les tourbières stockent environ 600 Pg C (Yu *et al.*, 2010) et leurs mises en culture auraient émis environ 72 Pg entre les années 1850 et 2010 (Qiu *et al.*, 2021). La mise en culture des tourbières se fait généralement en drainant le sol afin de pouvoir ensuite bénéficier de la matière organique et de sa fertilité. La mise en culture par drainage réduit les conditions d'anoxie ce qui favorise les émissions de CO₂ mais réduit les émissions de CH₄ (Huang *et al.*, 2021). Néanmoins, l'activité microbienne est accélérée par le drainage *via* une augmentation de l'oxygénation ce qui induit des pertes de carbone. La protection de ces écosystèmes peut également être vue comme une solution fondée sur la nature. D'autant plus que, selon les scénarios climatiques, les tourbières naturelles pourraient continuer à stocker du carbone dans le futur (Qiu *et al.*, 2020). De plus, la préservation des écosystèmes naturels est aussi une solution gagnant-gagnant du point de vue de la protection de la biodiversité.

Un autre écosystème qui possède des stocks de carbone dans les sols particulièrement importants est constitué par les prairies. Ces dernières peuvent être naturelles mais une grande partie est gérée pour permettre de produire de la nourriture pour les animaux d'élevage. L'augmentation mondiale du cheptel, bien qu'associée à une diminution des populations de grands herbivores sauvages, a augmenté la pression sur les prairies et leur bilan net sur le climat semble actuellement neutre (Chang *et al.*, 2021) car les prairies naturelles stockent du carbone alors que l'utilisation des prairies pour nourrir le cheptel tend à émettre des gaz à effet de serre. Préserver les prairies naturelles permettrait de maintenir cet équilibre. Cette mesure pourrait

même être associée à des pratiques de gestion pour restaurer les prairies anthropisées favorisant ainsi le stockage de carbone à des taux pouvant aller jusqu'à 0.57 Pg C yr⁻¹ (Batjes, 2019).

Dans les exemples présentés dans cette section, un des points clés est donc la préservation des sols et la réduction de l'artificialisation des sols. Ceci s'inscrit en France dans l'objectif zéro artificialisation net pour 2050 dont la dynamique a été lancée par le plan biodiversité en 2018 puis par la convention citoyenne en 2020. Néanmoins, cette démarche, bien qu'étant un moindre mal, n'est pas suffisante si l'on considère cela du point de vue climatique car la renaturalisation des espaces laissés à l'abandon qui permettrait de compenser l'artificialisation d'espaces naturels ne signifie pas que le bilan carbone net sera nul, notamment si l'espace artificialisé est riche en carbone comme une forêt ou une prairie par exemple.

8. LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE SONT-ELLES LA CLÉ POUR ATTÉNUER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

En conclusion, les solutions fondées sur la nature sont indispensables à mettre en œuvre si l'on souhaite atténuer les effets du changement climatique. Cependant, elles doivent être vues, non pas comme des solutions magiques qui nous exempteraient de modifier en profondeur le système économique et notre relation avec le reste du vivant mais plutôt comme une partie du portefeuille de solutions existantes, nécessaires mais très largement insuffisantes à elles seules. Leur efficacité réelle dépend de chaque situation et nécessite une estimation rigoureuse adaptée au contexte pédoclimatique et socio-économique à des échelles territoriales précises. En outre, l'estimation du bilan C potentiel dépend du périmètre de comptabilité identifié, les échelles territoriales étant à la fois plus pertinentes mais aussi plus complexes à appréhender car elles requièrent de considérer les interactions entre écosystèmes agricoles et forestiers et fonctionnement des sociétés (cf section 5). Pour cette raison, cet article a mis l'accent sur la dimension méthodologique plus que sur les différentes estimations empiriques de l'efficacité potentielle associée à chaque solution fondée sur la nature et s'inscrit ainsi dans une démarche heuristique.

Ainsi, il est indispensable de rappeler que quelles que soient les solutions fondées sur la nature, leur mise en place n'a de sens que si elle est accompagnée d'une très forte réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ceci est d'autant plus vrai que la mise en place de techniques de fixation du carbone atmosphérique par les surfaces terrestres s'accompagnera mécaniquement d'émissions par l'océan. En effet, si les concentrations de CO₂ diminuent à l'avenir en raison de

faibles émissions et d'importantes émissions négatives, les océans devraient rejeter du CO₂ dans l'atmosphère lorsque la concentration diminue par équilibrage des pressions partielles de CO₂ à l'interface océan-atmosphère. Ce dégazage des puits terrestres et océaniques est appelé « effet de rebond » du cycle global du carbone. Il réduira l'efficacité des émissions négatives et augmentera le niveau de déploiement nécessaire pour atteindre un objectif de stabilisation du climat (Jia *et al.*, 2019).

D'autre part, toutes les solutions fondées sur la nature ont également des impacts sur d'autres aspects tels que la biodiversité, la santé, la production matérielle et l'économie. Il est donc important de considérer leurs mises en place en évaluant leurs impacts autres que ceux liés au climat (Seddon, 2022). Enfin, l'efficacité des solutions fondées sur la nature dépend aussi du climat, en conséquent l'efficacité des solutions fondées sur la nature sera fonction de la trajectoire climatique future (Jia *et al.*, 2019). Un autre point important à mentionner est la différence entre le potentiel biophysique et l'effet réalisé. La différence s'explique dans la plupart des cas par des effets socio-économiques qui sont par exemple le coût de la mise en place et du maintien des solutions fondées sur la nature (Pellerin *et al.*, 2017), la volonté des décideurs publiques et l'acceptation par la population de la mise en place de celles-ci (Smith *et al.*, 2016).

REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le projet ALAMOD du PEPR exploratoire FairCarboN et a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence (ANR-22-PEXF-002). Bertrand Guenet remercie également les projets Européens Holisoils (Grant 101000289) et MRV4SOC (Grant 101112754) pour le soutien financier. Samuel Abiven remercie le programme GRAINE de l'ADEME.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson-Teixeira K.J., Wang M.M.H., McGarvey J.C., Herrmann V., Tepley A.J., Bond-Lamberty B., LeBauer D.S. (2018). ForC: a global database of forest carbon stocks and fluxes. *Ecology*, 99, pp. 1507.
- Anderson T.R., Hawkins E., Jones P.D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40, pp. 178-187.
- Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Grandeau G., Beaudoin N. (2016). Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 232, pp. 150-164.
- Batjes N.H. (2019). Technologically achievable soil organic carbon sequestration in world croplands and grasslands. *L. Degrad. Dev.*, 30, pp. 25-32.
- Bellé S.L., Riotte J., Backhaus N., Sekhar M., Jouquet P., Abiven S. (2022). Tailor-made biochar systems: Interdisciplinary evaluations of ecosystem services and farmer livelihoods in tropical agro-ecosystems. *PLoS One*, 17, pp. 1-24.
- Benning J.W., Moeller D.A. (2021). Microbes, mutualism, and range margins: testing the fitness consequences of soil microbial communities across and beyond a native plant's range. *New Phytol.*, 229, pp. 2886-2900.
- Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D., Fanin N., Fontaine S., Guenet B., Karimi B., Marsden C., Maron P.A. (2022). Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralisation. *Funct. Ecol.*
- Bonneuil C., Choquet P.L., Franta B. (2021). Early warnings and emerging accountability: Total's responses to global warming, 1971-2021. *Glob. Environ. Chang.*, 71, pp. 102386.
- Bruni E., Guenet B., Huang Y., Clivot H., Virto I., Farina R., Kätterer T., Ciais P., Martin M., Chenu C. (2021). Additional carbon inputs to reach a 4 per 1000 objective in Europe: feasibility and projected impacts of climate change based on Century simulations of long-term arable experiments. *Biogeosciences*, 18, pp. 3981-4004.
- Cardinael R., Guenet B., Chevallier T., Dupraz C., Cozzi T., Chenu C. (2018). High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system - Combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15, pp. 297-317.
- Cavicchioli R., Ripple W.J., Timmis K.N., Azam F., Bakken L.R., Baylis M., Behrenfeld M.J., Boetius A., Boyd P.W., Classe, A.T., Crowther J.W., Danovaro R., Foreman C.M., Huisman J., Hutchins D.A., Jansson J.K., Karl D.M., Koskella B., Mark Welch D.B., Martiny J.B.H., Moran M.A., Orphan V.J., Reay D.S., Remais J. V., Rich V.I., Singh B.K., Stein L.Y., Stewart F.J., Sullivan M.B., van Oppen M.J.H., Weaver S.C., Webb E.A., Webster N.S. (2019). Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. *Nat. Rev. Microbiol.*, 17, pp. 569-586.
- Chang J., Ciais P., Gasser T., Smith P., Herrero M., Havlík P., Obersteiner M., Guenet B., Goll D.S., Li W., Naipal V., Peng S., Qiu C., Tian H., Viovy N., Yue C., Zhu D. (2021). Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nat. Commun.*, 12, pp. 1-10.
- Chen S., Zou J., Hu Z., Lu Y. (2020). Temporal and spatial variations in the mean residence time of soil organic carbon and their relationship with climatic, soil and vegetation drivers. *Glob. Planet. Change*, 195, pp. 103359.
- Coppola A.I., Wiedemeier D.B., Galy V., Haghipour N., Hanke U.M., Nascimento G.S., Usman M., Blattmann T.M., Reisser M., Freymond C. V., Zhao M., Voss B., Wacker L., Schefuß E., Peucker-Ehrenbrink B., Abiven S., Schmidt M.W.I., Eglinton T.I. (2018). Global-scale evidence for the refractory nature of riverine black carbon. *Nat. Geosci.*, 11, pp. 584-588.
- Dahan A. (2010). Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward global change. *Stud. Hist. Philos. Sci. Part B - Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.*, 41, pp. 282-292.
- Erb K.H., Haberl H., Le Noë J., Tappeiner U., Tasser E., Gingrich S. (2022). Changes in perspective needed to forge 'no-regret' forest-based climate change mitigation strategies. *GCB Bioenergy*, 14, pp. 246-257.
- Erb K.H., Kastner T., Plutzer C., Bais A.L.S., Carvalhais N., Fetzel T., Gingrich S., Haberl H., Lauk C., Niedertscheider M., Pongratz J., Thurner M., Luyssaert S. (2018). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553, pp. 73-76.
- Feliciano D., Ledo A., Hillier J., Nayak D.R. (2018). Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agric. Ecosyst. Environ.*, 254, pp. 117-129.
- Forster E.J., Healey J.R., Dymond C., Styles D. (2021). Commercial afforestation can deliver effective climate change mitigation under multiple decarbonisation pathways. *Nat. Commun.*, 12, pp. 1-12.
- Fourier J. (1827). Mémoire sur la température du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mémoires l'Académie R. des Sci. l'Institute Fr.*, 7, pp. 570-604.
- Fressoz J.-B. (2022). Énergie, matières premières : une histoire sans transition, 535 - mai, pp. 42-45.
- Friedlingstein P., O'sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Gregor L., Hauck J., Le Quéré C., Luijckx I.T., Olsen A., Peters G.P., Peters W., Pongratz J.,

- Schwingshackl C., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Alkama R., Arneeth A., Arora V.K., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bittig H.C., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Evans W., Falk S., Feely R.A., Gasser T., Gehlen M., Gkritzalis T., Gloege L., Grassi G., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Hefner M., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Jain A.K., Jersild A., Kadono K., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lefèvre N., Lindsay K., Liu J., Liu Z., Marland G., Mayot N., Mcgrath M.J., Metz N., Monacchi N.M., Munro D.R., Nakaoka S.I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P.I., Pan N., Pierrot D., Pockock K., Poulter B., Resplandy L., Robertson, E., Rödenbeck C., Rodriguez C., Rosan T.M., Schwinger J., Séférian R., Shutler J.D., Skjelvan I., Steinhoff T., Sun Q., Sutton A.J., Sweeney C., Takao S., Tanhua T., Tans P.P., Tian X., Tian H., Tilbrook B., Tsujino H., Tubiello F., Van Der Werf G.R., Walker A.P., Wanninkhof R., Whitehead C., Willstrand Wranne A., Wright R., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J., Zheng B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, pp. 4811-4900.
- Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P., Ruiz-Jaen M.C., Fröberg M., Stendahl J., Philipson C.D., Mikusiński G., Andersson E., Westerlund B., Andrén H., Moberg F., Moen J., Bengtsson J. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nat. Commun.*, 4.
- Gingrich S., Erb K.H., Krausmann F., Gaube V., Haberl H. (2007). Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: A comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000. *Reg. Environ. Chang.*, 7, pp. 37-47.
- Gingrich S., Lauk C., Krausmann F., Erb K.H., Le Noë J. (2021). Changes in energy and livestock systems largely explain the forest transition in Austria (1830-1910). *Land use policy*, 109, pp. 1-11.
- Gingrich S., Lauk C., Niedertscheider M., Pichler M., Schaffartzik A., Schmid M., Magerl A., Le Noë J., Bhan M., Erb K. (2019). Hidden emissions of forest transitions: a socio-ecological reading of forest change. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 38, pp. 14-21.
- Girardin C.A.J., Jenkins S., Seddon N., Allen M., Lewis S.L., Wheeler C.E., Griscom B.W., Malhi Y. (2021). Nature-based solutions can help cool the planet - if we act now. *Nature*, 593, pp 191-194.
- Goldstein A., Turner W.R., Spawn S.A., Anderson-Teixeira K.J., Cook-Patton S., Fargione J., Gibbs H.K., Griscom B., Hewson J.H., Howard J.F., Ledezma J.C., Page S., Koh L.P., Rockström J., Sanderman J., Hole D.G. (2020). Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. *Nat. Clim. Chang.*, 10, pp. 287-295.
- Griscom B.W., Adams J., Ellis P.W., Houghton R.A., Lomax G., Miteva D.A., Schlesinger W.H., Shoch D., Siikamäki J. V., Smith P., Woodbury P., Zganjar C., Blackman A., Campari J., Conant R.T., Delgado C., Elias P., Gopalakrishna T., Hamsik M.R., Herrero M., Kiesecker J., Landis E., Laestadius L., Leavitt S.M., Minnemeyer S., Polasky S., Potapov P., Putz F.E., Sanderman J., Silvius M., Wollenberg E., Fargione J. (2017). Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 114, pp. 11645-11650.
- Hanson P.J., Griffiths N.A., Iversen C.M., Norby R.J., Sebestyen S.D., Phillips J.R., Chanton J.P., Kolka R.K., Malhotra A., Oleheiser K.C., Warren J.M., Shi X., Yang X., Mao J., Ricciuti D.M. (2020). Rapid Net Carbon Loss From a Whole-Ecosystem Warmed Peatland. *AGU Adv.*, 1.
- Huang Y., Ciais P., Luo Y., Zhu D., Wang Y., Qiu C., Goll D.S., Guenet B., Makowski D., De Graaf I., Leifeld J., Kwon M.J., Hu J., Qu L. (2021). Tradeoff of CO₂ and CH₄ emissions from global peatlands under water-table drawdown. *Nat. Clim. Chang.*
- Hudiburg T.W., Law B.E., Moomaw W.R., Harmon M.E., Stenzel J.E. (2019). Meeting GHG reduction targets requires accounting for all forest sector emissions. *Environ. Res. Lett.*, 14.
- Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L. (2019). Land-climate interactions. In: *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* (eds. Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., et al.). pp. 131-248.
- Kauppi P.E., Ciais P., Högberg P., Nordin A., Lappi J., Lundmark T., Wernick I.K. (2020). Carbon benefits from Forest Transitions promoting biomass expansions and thickening. *Glob. Chang. Biol.*, 26, pp. 5365-5370.
- Keith H., Lindenmayer D., Macintosh A., Mackey B. (2015). Under what circumstances do wood products from native forests benefit climate change mitigation? *PLoS One*, 10, pp. 1-23.
- Kim D.G., Kirschbaum M.U.F.F., Beedy T.L. (2016). Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agric. Ecosyst. Environ.*
- Luyssaert S., Marie G., Valade A., Chen Y., Njakou Djomo S., Ryder J., Otto J., Naudts K., Lamsø A.S., Ghattas J., Mcgrath M.J. (2018). Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 562, pp. 259-262.
- Luyssaert S., Schulze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455, pp. 213-215.
- Magerl A., Matej S., Kaufmann L., Le Noë J., Erb K., Gingrich S. (2022). Forest carbon sink in the U.S. (1870-2012) driven by substitution of forest ecosystem service flows. *Resour. Conserv. Recycl.*, 176.
- Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G.I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytol.*, 196, pp. 79-91.
- Marques A., Martins I.S., Kastner T., Plutzer C., Theurl M.C., Eisenmenger N., Huijbregts M.A.J., Wood R., Stadler K., Bruckner M., Canelas J., Hilbers J.P., Tukker A., Erb K., Pereira H.M. (2019). Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth. *Nat. Ecol. Evol.*, 3, pp. 628-637.
- Martin M.P., Dimassi B., Román Dobarco M., Guenet B., Arrouays D., Angers D.A., Blache F., Huard F., Soussana J.F., Pellerin S. (2021). Feasibility of the 4 per 1000 aspirational target for soil carbon: A case study for France. *Glob. Chang. Biol.*, 27, pp. 2458-2477.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gommis M.I.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R.B.R., Maycock T.K.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gommis M.I.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R.B.R., Maycock T.K.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gommis M.I.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R.B.R., Maycock T.K.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- Mather A.S. (1992). The Forest Transition. *Area*, 24, pp. 367-379.
- McBeath A.V., Smernik R.J. (2009). Variation in the degree of aromatic condensation of chars. *Org. Geochem.*, 40, pp. 1161-1168.
- Meinshausen M., Nicholls Z.R.J., Lewis J., Gidden M.J., Vogel E., Freund M., Beyerle U., Gessner C., Nauels A., Bauer N., Canadell J.G., Daniel J.S., John A., Krummel P.B., Luderer G., Meinshausen N., Montzka S.A., Rayner P.J., Reimann S., Smith S.J., Van Den Berg M., Velders G.J.M., Vollmer M.K., Wang R.H.J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, 13, pp. 3571-3605.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.-C., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, pp. 59-86.

- Moore J.W. (2010). The End of the Road ? *Agricultural World-Ecology*, 1450 - 2010. *J. of Agrarian Chang.*, 10, pp. 389-414.
- Müller S., Backhaus N., Nagabovanalli P., Abiven S. (2019). A social-ecological system evaluation to implement sustainably a biochar system in South India. *Agron. Sustain. Dev.*, 39.
- Naipal V., Ciais P., Wang Y., Lauerwald R., Guenet B., Van Oost K. (2018). Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD-1850-2005. *Biogeosciences*, 15, pp. 4459-4480.
- Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luysaert S. (2016). Europe's forest management did not Mitigate Climate Warming. *Science* (80-), 351, pp. 597-601.
- Le Noë J., Erb K.H., Matej S., Magerl A., Bhan M., Gingrich S. (2021). Altered growth conditions more than reforestation counteracted forest biomass carbon emissions 1990-2020. *Nat. Commun.*, 12, pp. 1-10.
- Le Noë J., Matej S., Magerl A., Bhan M., Erb K.H., Gingrich S. (2020). Modeling and empirical validation of long-term carbon sequestration in forests (France, 1850-2015). *Glob. Chang. Biol.*, 26, pp. 2421-2434.
- O'Leary B.C., Fonseca C., Cornet C.C., de Vries M.B., Degia A.K., Failler P., Furlan E., Garrabou J., Gil A., Hawkins J.P., Krause-Jensen D., Le Roux X., Peck M.A., Pérez G., Queirós A.M., Rózyński G., Sanchez-Arcilla A., Simide R., Sousa Pinto I., Trégarot E., Roberts C.M. (2023). Embracing Nature-based Solutions to promote resilient marine and coastal ecosystems. *Nature-Based Solut.*, 3, pp. 100044.
- Paoli G.D., Wells P.L., Meijaard E., Struebig M.J., Marshall A.J., Obidzinski K., Tan A., Rafiastanto A., Yaap B., Ferry Slik J.W., Morel A., Perumal B., Wielaard N., Husson S., D'Arcy L. (2010). Biodiversity Conservation in the REDD. *Carbon Balance Manag.*, 5, pp. 1-9.
- Pardon P., Reubens B., Mertens J., Verheyen K., De Frenne P., De Smet G., Van Waes C., Reheul D. (2018). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agric. Syst.*, 166, pp. 135-151.
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samsou E., Savini I., Pardon L., Chemineau P. (2017). Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environ. Sci. Policy*, 77, pp. 130-139.
- Potapov P., Hansen M.C., Laestadius L., Turubanova S., Yaroshenko A., Thies C., Smith W., Zhuravleva I., Komarova A., Minnemeyer S., Esipova E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Sci. Adv.*, 3, pp. 1-14.
- Qiu C., Ciais P., Zhu D., Guenet B., Peng S., Petrescu A.M.R., Lauerwald R., Makowski D., Gallego-Sala A. V., Charman D.J., Brewer S.C. (2021). Large historical carbon emissions from cultivated northern peatlands. *Sci. Adv.*, 7, pp. eabf1332.
- Qiu C., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Peng S. (2020). The role of northern peatlands in the global carbon cycle for the 21st century. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 29, pp. 956-973.
- Reisser M., Purves R.S., Schmidt M.W.I., Abiven S. (2016). Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. *Front. Earth Sci.*, 4, pp. 1-14.
- Riggers C., Poeplau C., Don A., Frühauf C., Dechow R. (2021). How much carbon input is required to preserve or increase projected soil organic carbon stocks in German croplands under climate change? *Plant Soil*.
- Riisager-Simonsen C., Fabi G., van Hoof L., Holmgren N., Marino G., Lisbjerg D. (2022). Marine nature-based solutions: Where societal challenges and ecosystem requirements meet the potential of our oceans. *Mar. Policy*, 144.
- Russell L.M., Rasch P.J., MacE G.M., Jackson R.B., Shepherd J., Liss P., Leinen M., Schimel D., Vaughan N.E., Janetos A.C., Boyd P.W., Norby R.J., Caldeira K., Merikanto J., Artaxo P., Melillo J., Morgan M.G. (2012). Ecosystem impacts of geoengineering: A review for developing a science plan. *Ambio*, 41, pp. 350-369.
- Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Manag.*, 5, pp. 81-91.
- Schmidt H.P., Kammann C., Hagemann N., Leifeld J., Bucheli T.D., Sánchez Monedero M.A., Cayuela M.L. (2021). Biochar in agriculture - A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13, pp. 1708-1730.
- Searchinger T.D., Beringer T., Holtzmark B., Kammen D.M., Lambin E.F., Lucht W., Raven P., van Ypersele J.P. (2018). Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nat. Commun.*, 9, pp. 10-13.
- Seddon N. (2022). Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*, 376, pp. 1410-1416.
- Shepherd J.G. (2012). Geoengineering the climate: an overview and update. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, 370, pp. 4166-75.
- Singh N., Abiven S., Maestrini B., Bird J.A., Torn M.S., Schmidt M.W.I. (2014). Transformation and stabilization of pyrogenic organic matter in a temperate forest field experiment. *Glob. Chang. Biol.*, 20, pp. 1629-1642.
- Singh N., Abiven S., Torn M.S., Schmidt M.W.I. (2012). Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale. *Biogeosciences*, 9, pp. 2847-2857.
- Sleutel S., De Neve S., Németh T., Tóth T., Hofman G. (2006). Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *Eur. J. Agron.*, 25, pp. 280-288.
- Smith P., Davis S.J., Creutzig F., Fuss S., Minx J., Gabrielle B., Kato E., Jackson R.B., Cowie A., Kriegler E., van Vuuren D.P., Rogelj J., Ciais P., Milne J., Canadell J.G., McCollum D., Peters G., Andrew R., Krey V., Shrestha G., Friedlingstein P., Gasser T., Grübler A., Heidug W.K., Jonas M., Jones C.D., Kraxner F., Littleton E., Lowe J., Moreira J.R., Nakićenovic N., Obersteiner M., Patwardhan A., Rogner M., Rubin E., Sharifi A., Torvanger A., Yamagata Y., Edmonds J., Yongsung C. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nat. Clim. Chang.*, 6, pp. 42-50.
- Ter-Mikaelian M.T., Colombo S.J., Lovekin D., Mckechnie J., Reynolds R., Titus B., Laurin E., Chapman A.M., Chen J., Maclean H.L. (2015). Carbon debt repayment or carbon sequestration parity? Lessons from a forest bioenergy case study in Ontario, Canada. *GCB Bioenergy*, 7, pp. 704-716.
- Tipping E., Somerville C.J., Luster J. (2016). The C:N:P:S stoichiometry of soil organic matter. *Biogeochemistry*, 130, pp. 117-131.
- Tyndall J. (1861). The Bakerian Lecture: On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 151, pp. 1-36.
- Van Oost K., Quine T.A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J. V., da Silva J.R.M., Merckx R. (2007). The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 318, pp. 626-9.
- Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.*, 1.
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D.P., Beilman D.W., Hunt S.J. (2010). Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37.
- Zhang W.J., Wang X.J., Xu M.G., Huang S.M., Liu H., Peng C. (2010). Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 7, pp. 409-425.
- Zhu X., Liu W., Chen J., Bruijnzeel L.A., Mao Z., Yang X., Cardinael R., Meng F.R., Sidle R.C., Seitz S., Nair V.D., Nanko K., Zou X., Chen C., Jiang X.J. (2019). Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes. *Plant Soil*.

