

# LE CARBONE ET LE RÔLE DU FORESTIER

Luc Abbadie

*Nous sommes très heureux d'accueillir le professeur Abbadie de Sorbonne Université, où il enseigne l'écologie à l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris. Il est également directeur de l'Institut de la transition environnementale de Sorbonne Université. M. Abbadie est à la fois professeur et chercheur. Ses travaux de recherche se situent à l'interface sol-plante et portent sur la dynamique des nutriments.*

*Aujourd'hui, il vient nous parler du carbone, et principalement du rôle du forestier.*

*Alexandra d'Harcourt*

J'ai repris le titre proposé et je vous parlerai du carbone, de changement climatique et de biodiversité.

Je vais commencer par quelques informations récentes sur le changement climatique, car il y a un mois, le GIEC a rendu son 6<sup>ème</sup> rapport, qui permet de faire le point sur la situation.

Vous verrez que derrière les questions de carbone il y a des questions de climat et de biodiversité.

## LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, UNE RÉALITÉ

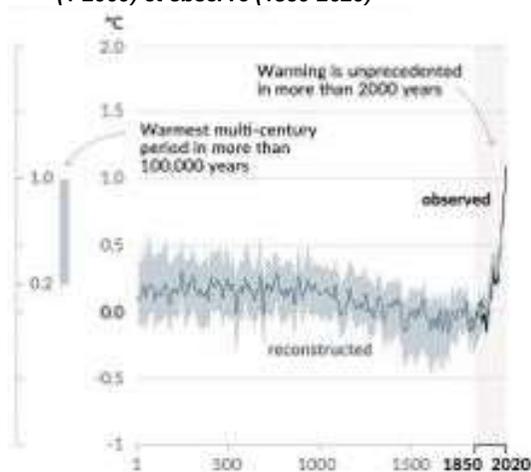
Commençons par le changement climatique, qui est une chose maintenant avérée.

La représentation de l'évolution de la température moyenne mondiale depuis les années 1850 a permis la reconstitution, par différentes techniques, des températures des périodes précédentes.

On observe un changement majeur, qui a commencé avec la période de l'anthropocène, période de l'histoire où l'espèce humaine est devenue un facteur de contrôle majeur d'un certain nombre de processus planétaires (climat, chimie de l'atmosphère, en grande partie érosion des sols, etc...), et qui est aujourd'hui marqué par une accélération exponentielle de ces processus. Ainsi, la température moyenne mondiale a augmenté de 1,09°C entre 1850 et 2020. Ce qui veut dire que nous sommes déjà

légèrement au-dessus des plus chaudes températures enregistrées depuis 100 000 ans.

### a) *changement de la température à la surface du globe (moyenne décennale) tel que reconstitué (1-2000) et observé (1850-2020)*



**Légende :** Barre de gauche: température la plus chaude pendant les 100 000 dernières années

Barre de droite: le réchauffement est sans précédent depuis plus de 2000 ans

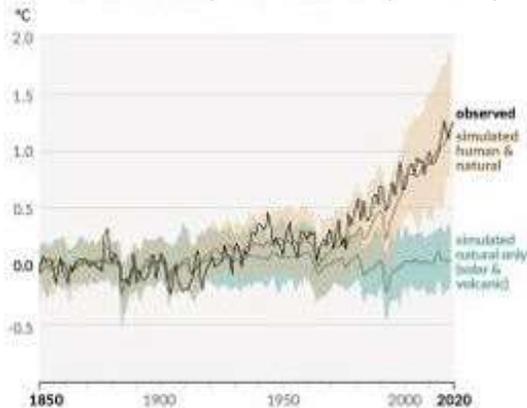
**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.

On constate donc un phénomène de réchauffement climatique en cours, que l'on ne discute plus aujourd'hui. La valeur moyenne de 1,1 °C peut sembler faible, mais

elle se décline différemment, selon les altitudes et les latitudes, et peut parfois être multipliée par deux. Cet écart a tendance à augmenter actuellement.

Aujourd'hui, pour essayer de comprendre ce qui se passe, les climatologues ont créé des modèles qui simulent l'évolution du climat. Il en existe au moins deux principaux pour la France qui participent à ces grands exercices de prédiction des changements climatiques futurs. Ces modèles sont devenus extrêmement fiables sur l'évolution des températures. En faisant tourner ces modèles, on est capable de reconstituer un passé climatique récent, qui, lui, est avéré par des mesures. Ces modèles sont régulièrement enrichis par les nouvelles connaissances acquises, et, même si la certitude absolue n'existe pas en matière scientifique, on peut affirmer, aujourd'hui, que ces modèles sont robustes et fiables.

**b) changement de la température de la surface du globe (moyenne annuelle) tel qu'observé et simulé en utilisant des facteurs naturels & humains et uniquement naturels (1850-2020)**



**Légende :** *observed - simulated human & natural : observé - simulés humains et naturels*  
*simulated - natural only (solar & volcanic) : simulé - naturel uniquement (solaire & volcanique)*

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. In Press.

Le schéma ci-dessus est intéressant, car avec ces modèles, on a pu reconstituer l'évolution du climat depuis 1850. Si nous ne tenons compte que des phénomènes naturels (en bleu sur le schéma), c'est-à-dire sans les effets de l'activité humaine (en rose

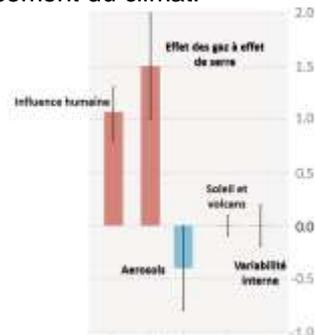
sur le schéma), nous voyons que la température moyenne mondiale n'aurait pas changé entre 1850 et 2020.

Le verdict scientifique est clair : il ressort de ce constat que l'essentiel de l'évolution climatique aujourd'hui est dû aux impacts des activités humaines. Cela confirme les théories de l'anthropocène qui disent que l'humain est le facteur majeur de l'évolution de la planète.

Cela veut également dire que les solutions sont entre nos mains.

**Question :** *malgré le développement des activités humaines, entre 1940 et 1970, on observe un léger refroidissement. Pouvez-vous l'expliquer ?*

Cette évolution, vraisemblablement, est liée aux changements de la composition de la chimie de l'atmosphère, mais il n'y a pas que le CO<sub>2</sub> qui joue sur cette composition. Le GIEC a mis en évidence des déterminants qui orientent vers le réchauffement et des déterminants qui tendent vers le refroidissement du climat.

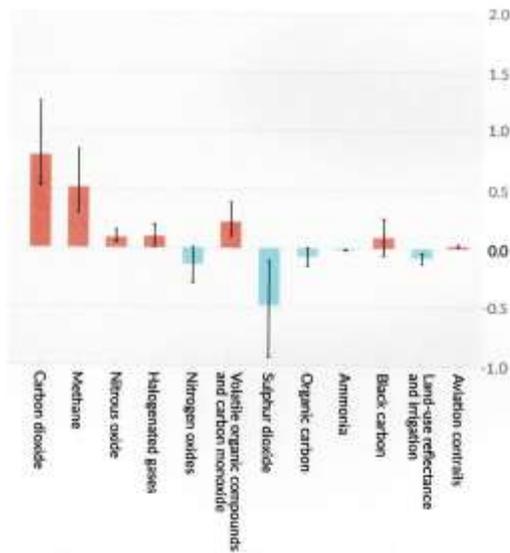


**Légende :** *L'augmentation de la température moyenne mondiale entre 1850 et 2020 de 1,07°C est le résultat d'un réchauffement de 1 à 2°C dû au surplus de gaz à effet de serre et d'un refroidissement de 0 à 0,8 °C dû au surplus d'aérosols*

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. In Press.

Ce graphique nous montre les effets des gaz à effet de serre, qui comptent pour 1,5° dans le réchauffement, alors que le réchauffement mesuré est de l'ordre de 1,1°C. Mais vous avez également d'autres produits, comme les produits soufrés et les aérosols, qui eux, refroidissent l'atmosphère d'environ un demi-degré. Ils peuvent provenir d'activités humaines ou volcaniques, pour le soufre.

Il y a également de petites variations dues à l'activité du soleil et des volcans. Il y a une petite variabilité interne du système climatique qui entre en ligne de compte.



**Légende :** Carbon dioxide : Dioxyde de carbone – Methane : méthane – Nitrous oxide : Oxyde nitreux – Halogenated gases : Gaz halogénés – Nitrogen oxides : Oxydes d'azote – Volatile organic compounds and carbon monoxide : Composés organiques volatils et monoxyde de carbone – Sulphur dioxide : Dioxyde de soufre – Organic carbon : Carbone organique – Ammonia : Ammoniac – Black carbon : Carbone noir – Land-use reflectance and irrigation : Albedo des sols et irrigation – Aviation contrails : trainée d'avions

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.

Pour résumer, globalement, on a les aérosols qui refroidissent, ainsi que les émissions massives de soufre issues des éruptions volcaniques. Par exemple, le Pinatubo a diminué, pendant 2 ans de 0,1 à 0,2°C la

température moyenne mondiale. Il peut également y avoir des effets liés au monde vivant, mais pour le moment notre compréhension de ces phénomènes est faible.

Quand on additionne +1,5°C avec les gaz à effet de serre, et -0,4°C avec les aérosols, on arrive à +1,09°C à l'échelle planétaire.

Le forçage radiatif, en quelque sorte ce supplément d'énergie qui circule dans l'atmosphère, et qui induit l'augmentation de la température observée entre 1850 et 2020, est dû principalement au CO<sub>2</sub>, suivi par le méthane (souvent lié à l'agriculture, mais également aux sols inondés).

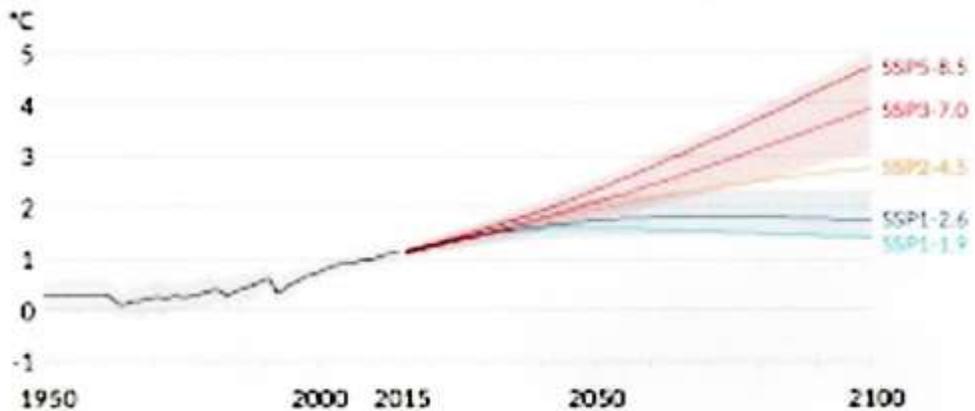
Parmi les gaz qui refroidissent, le gaz majoritaire est le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), lié aux activités humaines, mais également aux volcans qui le rejettent.

Pour lutter contre le réchauffement, une des solutions envisagées est d'injecter davantage de soufre dans l'atmosphère ! Ce qui peut poser d'autres problèmes...

Ce changement climatique, aujourd'hui, fait l'objet de **modèles prospectifs validés**, en fonction de différents scénarios économiques et sociaux. Ils constituent des scénarios de référence, référencés selon des sigles barbares : SSP5-8.5, etc. SSP peut se traduire par « scénario socio-économique ». En fonction de ces scénarios d'évolutions économiques et sociales, les évolutions de la température moyenne s'échelonnent entre 1,9 et 5 degrés pour les plus pessimistes. Avec le scénario le plus optimiste, dans lequel est arrêtée toute émission nette de CO<sub>2</sub> à très court terme, nous avons tout de même une augmentation de 1,5 à 2 degrés.

Le changement climatique est donc bien là, et il faudra vivre avec. La question est de savoir quel niveau d'augmentation de température nous sommes prêts à accepter. Et avec quelles conséquences ?

**a) Changement de la température de surface du globe par rapport à 1850-1900**



Le scénario SSP2-4,5 (SSP: Shared Socioeconomic Pathway) « business as usual » jusqu'en 2050, puis diminution des émissions, conduit à une augmentation de la température moyenne mondiale de 2,1 à 3,5°C en 2100.

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. In Press.

Je l'ai dit tout à l'heure, sur le plan des températures, actuellement nous sommes plutôt sur une trajectoire, à l'horizon 2100, qui se situe entre + 3 et 4°C.

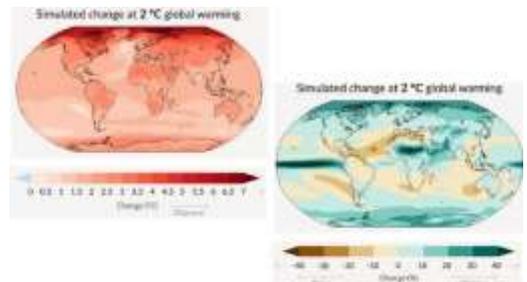
Mais cette augmentation n'est pas homogène à l'échelle de la terre, et dans certaines parties du globe, l'augmentation pourra atteindre 6 à 7 degrés, ce qui entraînera des changements importants de végétation.

Des effets de retour peuvent être inquiétants, notamment dans les régions présentement froides, avec de fortes augmentations de l'activité microbienne des sols. Actuellement, à basse température, la matière morte d'origine végétale n'est pas décomposée et s'accumule sur des épaisseurs considérables, constituant les plus gros stocks mondiaux de carbone dans les sols. Le réchauffement, très important dans ces régions, entraînera des dégradations massives de carbone organique en CO<sub>2</sub>, ce qui pourrait accélérer et amplifier le changement climatique. Ce risque fait partie des « inconnues », aujourd'hui non encore parfaitement maîtrisées dans les modèles.

À côté des températures, il y a les changements de précipitations, mais les prédictions des climatologues à leur endroit sont un peu moins fiables que celles sur les températures, surtout au niveau local. En règle générale, nous aurons des hauteurs de précipitations beaucoup plus élevées dans les latitudes nord, ainsi que dans les régions

équatoriales, avec, inévitablement, des changements de végétation.

En France, pour l'instant, le consensus est plutôt de dire qu'en termes de précipitations, nous ne connaissons pas de changements drastiques dans les quantités : environ 100 mm en plus ou en moins en moyenne selon les modèles. Par contre, ce qui changera, et que l'on commence à percevoir, c'est la répartition saisonnière.



À gauche la simulation de l'augmentation des températures pour une hausse moyenne mondiale de + 2°C.

À droite la simulation de l'augmentation des précipitations pour une hausse moyenne mondiale de + 2°C.

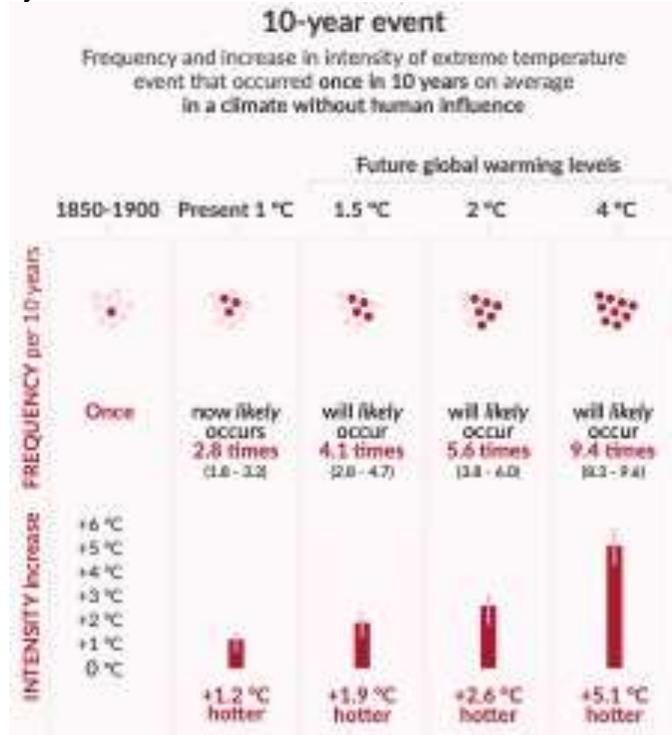
**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. In Press.

Le GIEC a résumé, pour les décideurs, sur un graphique, les événements extrêmes de températures (sécheresses et canicules), qui reviennent tous les 10 ans. Actuellement, les extrêmes de température sont 2,8 fois plus

nombreux et 1,2°C plus chauds (température moyenne) que pour la période dite préindustrielle antérieure à 1900. Si la température moyenne mondiale augmente de 4°C, les extrêmes de température seront 9,4 fois plus nombreux et de 5,1°C plus chauds.

Rappelons que le record en France date de 3 ans et se situe à 46°C dans le Gard. Avec l'hypothèse + 4°C, le record pourrait passer au-dessus de 50°C.

**Fréquence et augmentation de l'intensité d'un événement de température extrême qui se produit une fois tous les 10 ans en moyenne dans un climat sans influence humaine.**



Actuellement, les extrêmes de température sont 2,8 fois plus nombreux et 1,2°C plus chauds (température moyenne) que les canicules décennales avant 1900. Si la température moyenne mondiale monte à 4°C, les extrêmes de température seront 9,4 fois plus nombreux et 5,1°C plus chauds

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.

Encore une fois, ces prédictions peuvent être considérées comme fiables et doivent nous servir de base pour commencer à réfléchir à des stratégies d'atténuation, et surtout d'adaptation.

Puisque c'est le CO<sub>2</sub> qui est considéré comme le principal responsable, **différents scénarios ont été élaborés pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub>**.

Si nous voulons rester sur un changement climatique très faible, il faudrait baisser les émissions nettes de CO<sub>2</sub>, ce qui veut dire à la fois baisser la production de CO<sub>2</sub> et

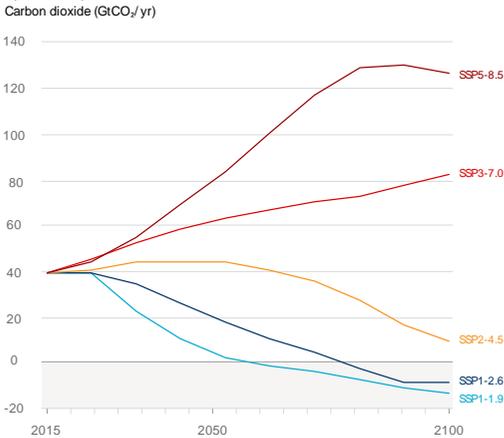
augmenter la séquestration du CO<sub>2</sub>, et cela immédiatement.

Pour un même niveau de CO<sub>2</sub>, il faudrait augmenter la séquestration, biologique ou technique.

L'idée est d'agir sur les sources d'émission de CO<sub>2</sub> concentrées, les sorties d'usines en quelque sorte, en injectant leurs rejets dans des couches géologiques ; par exemple les gisements de gaz qui ont été vidés peuvent être remplis par du CO<sub>2</sub> ; mais ce n'est pas complètement au point pour l'instant. On peut espérer que cela deviendra opérationnel.

Cela ne règle pas la question des transports par exemple, mais cela peut résoudre en partie le problème des émissions concentrées.

Il faudrait tout de suite baisser les émissions, et si nous suivons l'accord de Paris, il faudrait jusqu'en 2050-2070 stabiliser à peu près ce bilan ; dès à présent compenser ces émissions par de la séquestration, et, au-delà de 2070, faire du bilan net négatif, c'est-à-dire séquestrer plus que ce qui est émis. Ce scénario nous amènerait à une augmentation moyenne des températures de 2,1 à 2,2° C.



Le scénario SSP2-4,5, proche des objectifs de l'accord de Paris, suppose une quasi stagnation des émissions nettes de CO<sub>2</sub> jusqu'en 2070, puis une forte diminution au-delà.

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.

Jusqu'à présent, une augmentation de 2°C d'augmentation a été la limite prise en considération dans les négociations internationales. Elle n'est pas que politique et arbitraire. Elle est aussi liée au fait que, grosso modo, sur les 400 000 dernières années, on n'a pas observé plus de 2°C de variation de température moyenne. Cela signifie qu'au-delà de 2°C, nous entrons dans un monde que le vivant n'a pas connu depuis très longtemps et qu'il risque par conséquent d'avoir du mal à s'adapter.

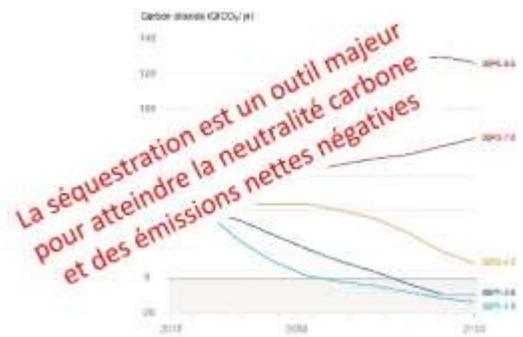
Ce changement climatique est d'une ampleur assez exceptionnelle, mais c'est surtout sa vitesse qui est inquiétante, puisqu'il est au moins 50 fois plus rapide que les

changements climatiques qui ont pu être reconstitués pour les 400 000 dernières années.

Avec les augmentations de température, les espèces remontent vers le nord, ce qui entraîne en théorie des changements importants, et l'on sait que bon nombre d'espèces n'y arriveront pas, dont les arbres.

Bref, cette situation n'est pas enviable, mais nous savons ce qu'il faut faire, techniquement, pour éviter une catastrophe « ingérable ».

Nous devons jouer sur tous les tableaux. La séquestration biologique est un outil majeur pour atteindre la neutralité carbone et des émissions négatives, même si parfois nous rêvons un peu, (les solutions proposées ne sont pas toujours très réalistes pour organiser des puits de carbone).



Le scénario SSP2-4,5, proche des objectifs de l'accord de Paris, suppose une quasi-stagnation des émissions nettes de CO<sub>2</sub> jusqu'en 2070, puis une forte diminution au-delà.

**Source :** IPCC, 2021 : Summary for Policymakers. In Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Six assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.

# CONSÉQUENCES SUR LA BIODIVERSITÉ

## Extinctions depuis 1500

Quelles peuvent être les conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité ?

Depuis les années 1500, des voyageurs naturalistes parcourent le monde et font des observations, que l'on considère comme fiables pour les relier à des organismes actuels. À partir de ces observations il a été possible de chiffrer des taux d'extinction par grands groupes d'espèces depuis 500 ans, qui sont estimés à 1,5 % en moyenne.

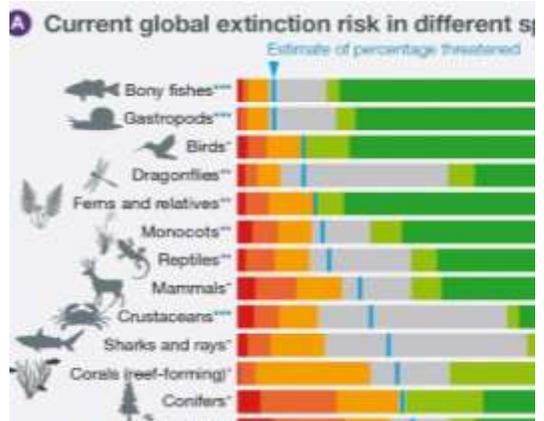
Les amphibiens sont les plus touchés : on considère qu'en France 80 % des amphibiens ont disparu en 500 ans !

C'est un chiffre nécessairement sous-estimé, car il existait de nombreuses espèces pour lesquelles nous n'avons pas de description en 1500, les premières observations portant essentiellement sur des « gros » animaux et les grandes plantes, davantage visibles que ceux et celles de petite taille.

Ensuite il y a eu les effets, parfois désastreux, des colonisations. Ainsi, dans les îles du Pacifique, on a vu des populations d'oiseaux exterminées par l'arrivée des animaux qui circulaient avec les humains, tels les rats qui mangeaient les œufs des nids au sol, etc... Il en résulte, au moment des colonisations une disparition de près de 10 % de l'avifaune mondiale en termes d'espèces.

Les situations sont très disparates, avec parfois des zones où il ne s'est quasiment rien passé.

Les groupes les plus touchés concernent les milieux humides. Ainsi, en France, 80% des espèces de ces milieux auraient disparu.



**Légende**, de haut en bas : Poissons osseux – gastéropodes – oiseaux – Libellules – Fougères – Monocotylédones – Mammifères – Crustacés - requins et raies – Coraux - Conifères

Risque d'extinction global actuel pour différents groupes : estimation du % menacé de disparition

**Source** : IPBES, 2019. Summary for Policy Makers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

## Érosion de la biodiversité

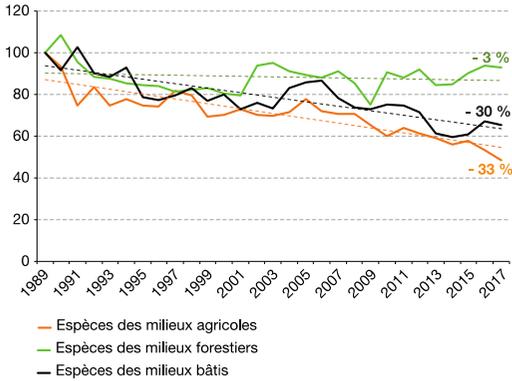
En France, depuis 1989, nous avons un suivi national des oiseaux, très bien organisé, basé sur un réseau d'observateurs bénévoles, de naturalistes amateurs, avec des protocoles précis d'observation et de validation des données.

Leurs observations sont compilées au niveau national par le Muséum d'Histoire naturelle.

Ces indicateurs nous montrent une perte du nombre d'espèces de l'ordre de 1 % par an pour les oiseaux des milieux agricoles et bâtis. C'est énorme, avec une pente incroyable quand on pense qu'il s'agit d'une variation du nombre total d'individus.

**ÉVOLUTION DE L'ABONDANCE DES POPULATIONS D'OISEAUX COMMUNS SPÉCIALISTES EN FRANCE MÉTROPOLITAINE**

En indice base 100 en 1989



**Source :** Office National de la Biodiversité, 2018. Les chiffres clés, édition 2018, 92 p.

**Note de lecture :** les trois valeurs indiquées sur le graphique correspondent à la tendance observée sur la période 1989-2017 (calculée à partir de la pente de la droite de régression linéaire, matérialisée en pointillés sur le graphique).

**Source :** programme STOC de Vigie-Nature. Traitements : CESCO-UMS PatriNat (AFB-CNRS-MNHN), décembre 2017.

Par contre, en forêt, la baisse du nombre d'espèces n'est pas significative. Il existe même des milieux protégés où la tendance est légèrement à la hausse. Cela montre que les solutions qui marchent, nous les connaissons !

Il y a un autre indicateur moins fiable parce que plus récent, sur les chauves-souris, qui nous donne 38 % de perte en 10 ans, 3 % de chute d'abondance par an. Là aussi c'est énorme.

**ÉVOLUTION DE L'ABONDANCE DES POPULATIONS DE CHAUVES-SOURIS MÉTROPOLITAINES**

En indice base 100 en 2006



**Notes :** prise en compte de sept espèces (groupe des *Myotis*, *P.kuhlii*, *P.pipistrellus*, *P.pygmaeus*, *E.serotinus*, *N.leisleri* et *N.noctule*) ; la valeur indiquée sur le graphique correspond à la tendance observée sur la période 2006-2016 (calculée à partir de la pente de la droite de régression linéaire, matérialisée en pointillés sur le graphique).

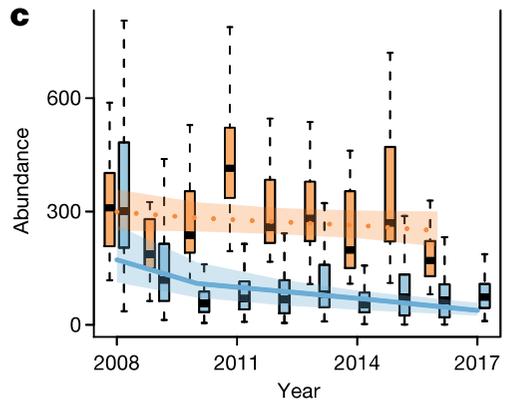
**Source :** Office National de la Biodiversité, 2018. Les chiffres clés, édition 2018, 92 p

Ces chiffres, pour les oiseaux, sont corroborés par d'autres observations du même genre, effectuées au niveau européen. Nous sommes bien face à un phénomène très inquiétant de la diminution de la biodiversité.

Les oiseaux sont d'assez bons indicateurs car ils sont souvent en bout de chaîne alimentaire, consommateurs d'insectes, d'invertébrés, etc., ce qui intègre bien ce qui se passe dans les niveaux inférieurs.

**Abondance des arthropodes en Allemagne**

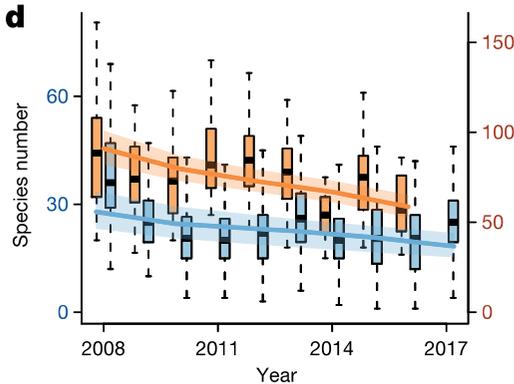
Le graphique suivant vient d'Allemagne et concerne les arthropodes (insectes, araignées, etc.), inventoriés dans diverses zones ; il différencie les milieux forestiers (en orange) et les prairies (en bleu). On peut y observer une tendance assez forte à la baisse du nombre d'individus, surtout dans les milieux ouverts des petites prairies. En forêt, la tendance n'est pas significative.



**Source :** Seibold S. et al. 2019. Nature 574: 671-674

## Nombre d'espèces d'arthropodes en Allemagne

Cette baisse d'abondance était attendue, mais ce qui l'est beaucoup moins c'est la baisse de 35 % du nombre d'espèces, aussi bien dans les prairies (bleu) qu'en forêt (orange) ce qui, dans le laps de temps très faible d'une dizaine d'années, est vraiment inquiétant.



Source : Seibold S. et al. 2019. *Nature* 574: 671-674

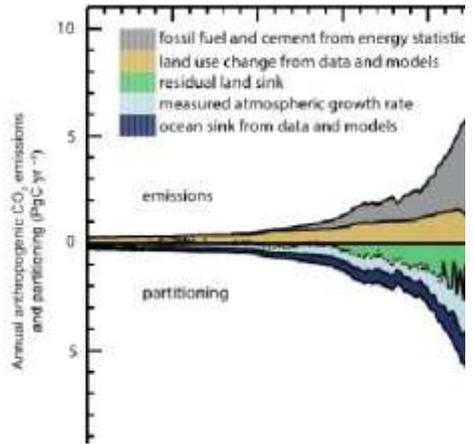
Le déterminant de tout cela est bien identifié : sur les écosystèmes terrestres, il s'agit de l'agriculture. Des études ont été menées dans l'ouest de la France et à l'échelon européen, qui montrent bien les choses. Deux facteurs jouent de façon massive : la perte d'espace des habitats et les modalités agricoles (intensivité, traitements, etc.). Le facteur numéro un reste, semble-t-il, la réduction des surfaces des habitats.

## LE CARBONE

### Origine et devenir des gaz à effet de serre (GES)

Ce schéma nous montre deux grands émetteurs. Le principal est la combustion du pétrole, du charbon et la production de ciments (en gris). Le second est la transformation des terres (en orange), dont la déforestation, ainsi que certaines techniques agricoles qui tendent à dégrader le sol : elles se traduisent par des émissions de CO<sub>2</sub>.

### Évolution des taux annuels d'émissions de carbone depuis 1750



Source : IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge and New York

Une partie de ce CO<sub>2</sub> part dans l'océan (en bleu marine) où il se dissout et réagit avec l'eau pour donner de l'acide carbonique, ce qui contribue à l'acidification, mesurée, de l'océan. Une autre partie reste dans l'atmosphère (en bleu clair) et la dernière partie se retrouve dans la végétation et secondairement dans les sols (en vert). Approximativement nous sommes sur une répartition par tiers.

Si nous n'avions pas les puits océaniques et continentaux, essentiellement les forêts, nous aurions un réchauffement climatique bien plus fort.

La question est de savoir combien de temps cela durera et jusqu'où nous pouvons aller, sachant que dans un premier temps nous pouvons compter sur les puits de carbone des océans et des forêts.

### Cycle planétaire du carbone

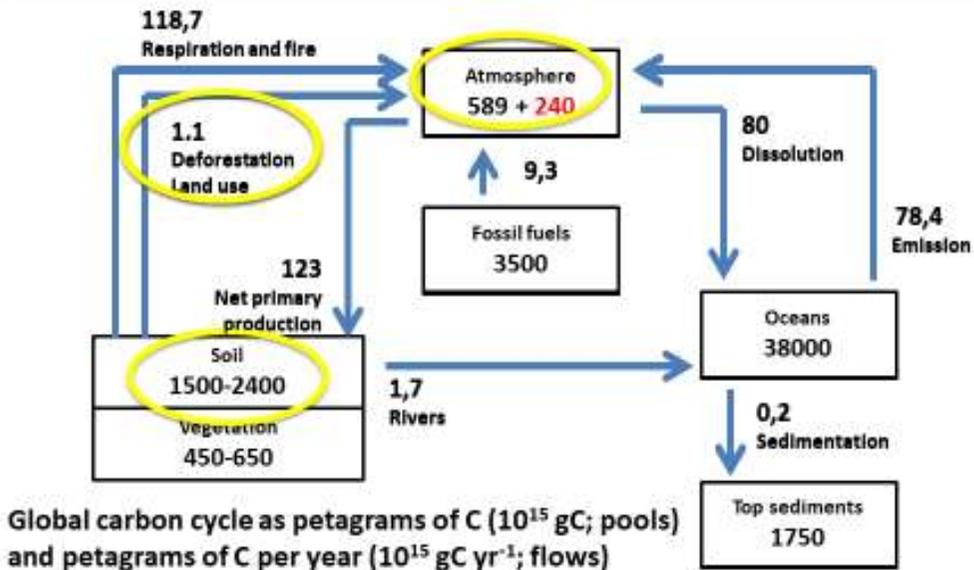
Rentrons un peu plus dans les chiffres pour montrer le potentiel final (et non la réalité !).

Il existait, avant l'apparition des humains, une certaine quantité de carbone dans l'atmosphère (589 Gt), à laquelle on ajoute, depuis 1850, l'activité humaine (+ 240) soit un total de 829 Gt, qui restent et se renouvellent dans l'atmosphère.

Nous avons également de l'enrichissement (9,3 Gt), qui provient de la combustion des combustibles fossiles, sachant que ces derniers représentent un réservoir de 3 500 Gt dans le sol.

Il faut aussi comptabiliser les émissions de carbone qui proviennent du changement d'usage des terres et de la déforestation (1,1 Gt).

# Cycle planétaire du carbone



Institute of Ecology and Environmental Sciences - Paris

Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris

Cycle global annuel du carbone, en milliard de tonnes, ou gigatonnes (Gt)

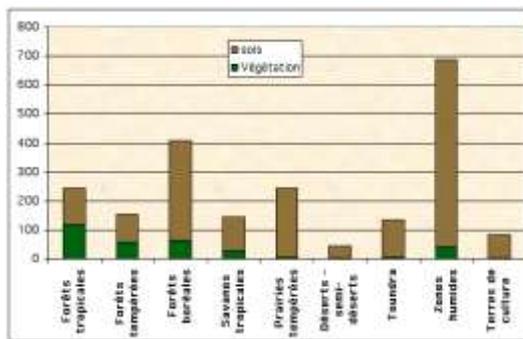
Source : Institute of Ecology and Environmental Sciences - Paris

Dans la végétation se trouve un stock de carbone estimé entre 450 et 650 Gt. Il existe également, et on l'oublie souvent, un stock considérable dans les sols, compris entre 1 500 et 2 400 Gt. La réserve comprise dans le sol et la végétation constitue un volume bien plus considérable que celle présente dans l'atmosphère. D'où l'idée bien connue d'essayer d'augmenter ce stock pour améliorer la situation du climat en séquestrant du carbone dans les sols et la végétation !

## Répartition du carbone dans l'écosystème

Les plus gros stocks de carbone se situent dans les zones humides (jusqu'à 700 tonnes de carbone par hectare), puis dans les forêts boréales d'où un problème potentiel important car le réchauffement pourrait entraîner un déstockage significatif du carbone de leurs sols et une émission massive de CO<sub>2</sub>.

Dans les forêts tempérées, le carbone, 150 à 200 tonnes/ha, se répartit pour environ moitié/moitié entre les sols et la végétation. Même constat pour les forêts tropicales, avec un volume de carbone un peu plus important, proche de 250 tonnes/ha, localisé essentiellement dans la végétation.



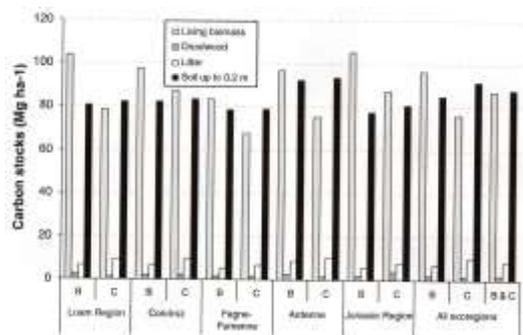
En tonne/hectare

Source : Institute of Ecology and Environmental Sciences - Paris

## Stocks de carbone

Pour résumer : une étude quantitative a été faite sur la Belgique, qui montre, par grandes régions naturelles et en fonction de la végétation, où est stocké ce carbone. Elle met en évidence qu'il y a peu de différences entre feuillus et conifères, de même qu'elle montre des quantités équivalentes entre la masse vivante et le sol.

Ces informations sont importantes pour la gestion des stocks.



Légende : B veut dire feuillus, C veut dire conifères

Living biomass : biomasse vivante – Deadwood : bois mort – Litter : litière – Soil up to 0,2 m : sol jusqu'à 0,2 m

Source : Latte et al. 2013. European Journal of Forest Research 132: 565-577

## Dynamique du carbone dans l'écosystème

La présence du carbone dans la végétation est liée à sa durée de vie, c'est-à-dire, pour les arbres, à la fréquence de la récolte.

Par exemple si vous fabriquez du bois-énergie, ce qui est mieux que d'utiliser du pétrole ou du charbon, vous effectuez un relargage très rapide du CO<sub>2</sub>. Si vous fabriquez du bois matériau, la durée de stockage est beaucoup plus longue.

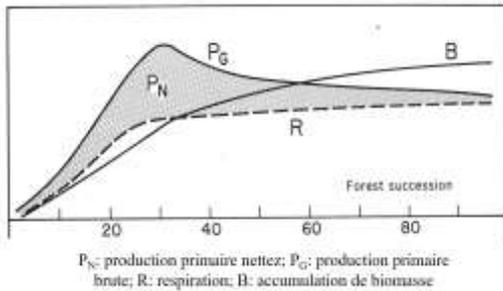
Dans les sols, la durée de stockage peut aussi être très longue. L'âge moyen du carbone, pour un sol sous nos climats, est compris entre 100 ans et 1 000 ans. Naturellement, toute matière qui va mourir, tige, feuille, racine, et plus particulièrement ces dernières, accroîtra le stock de carbone du sol.

Un collègue de l'INRAE, qui travaillait sur des sols de prairie, a réussi à déstocker du carbone qui avait 3 260 ans ! Il n'est donc pas fossilisé et peut être métabolisé par les microorganismes et retransformé en CO<sub>2</sub>. Donc si vous séquestrez du carbone dans le sol, vous êtes tranquille pour un bon bout de temps !

Sur le schéma théorique suivant, la trame en pointillé représente la production nette, c'est-à-dire le bilan entre la photosynthèse et les pertes respiratoires, en d'autres termes ce qui restera dans l'écosystème, donc dans la biomasse forestière. Après un pic de production, assez rapidement, on tend vers un niveau de stabilisation.

Du côté du sol, c'est un phénomène d'accumulation progressive qui apparaît avec le temps.

Le niveau de carbone du sol est, entre autres, fonction du niveau de production de la végétation.



$P_N$ : production primaire nette ;  $P_G$ : production primaire brute ;  $R$ : respiration ;  $B$ : accumulation de biomasse  
**Source** : Modified from: Odum E.P. 1971. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia, W.B. Saunders Company

Chaque fois que le forestier exploite des bois, il exporte du carbone et diminue inévitablement les quantités présentes dans la végétation et le sol. Nous avons le même schéma en agriculture.

## Dynamique de la biodiversité

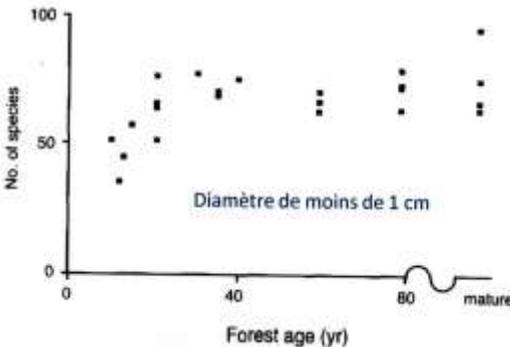
Y a-t-il un lien entre le stockage du carbone et la biodiversité ? Entre le développement de la forêt et la biodiversité ?

La réponse théorique est OUI, sachant que, dans la nature, il est très difficile d'organiser des suivis sur de longues périodes. Il y a peu d'endroits dans le monde où ils ont été mis en pratique.

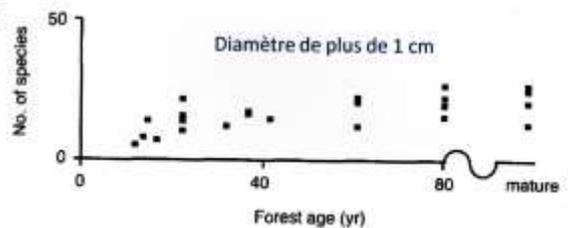
Il y a un effet temps sur la biodiversité, qui est généralement très supérieur dans les stades forestiers très avancés, mais pas nécessairement au stade terminal, ce qu'on ne voit pas sur le schéma suivant.

Notons aussi le lien entre la diversité des arbres et le temps de développement de la forêt, comme le prouve cette étude sur le nombre d'espèces d'arbres en fonction de l'âge de la forêt, réalisée dans la région du Rio Négro, en Colombie et au Vénézuéla.

## Dynamique de la biodiversité



Nombre d'espèces d'arbres dans la région du Haut Rio Negro, Colombie et Vénézuéla, en fonction de l'âge de la forêt



Nombre d'espèces d'arbres dans la région du Haut Rio Negro, en Colombie et au Vénézuéla, en fonction de l'âge de la forêt

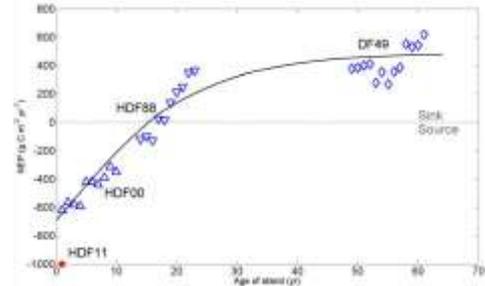
**Source** : Finegan B. 1996. *Trends in Ecology and Evolution* 11: 119-124

## Carbone organique du sol et argile

Je reviens sur le carbone, et sur la séquestration du carbone. Il y a deux grands mécanismes de séquestration du carbone : le premier est la capacité à accumuler physiquement les molécules organiques

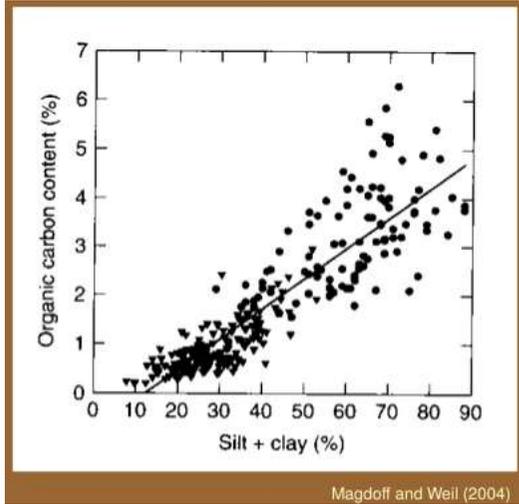
carbonées, cette capacité étant très dépendante de la teneur en argile. Certains types d'argile sont extrêmement favorables au blocage de l'activité microbienne. Ainsi, plus votre sol est argileux, plus vous avez de carbone dans le sol.

C'est donc beaucoup plus compliqué de stocker du carbone sur un sol sableux que sur un sol argileux. Si vous êtes propriétaires sur un sol argileux, vous pouvez envisager de stocker du carbone assez facilement, et éventuellement d'en tirer un profit financier. Sur un sol sableux, alors que vous avez effectué le même effort, c'est plus compliqué. Cela questionne le choix des paramètres pris en compte pour calculer une éventuelle rémunération de la séquestration du carbone.



Échange de carbone entre un peuplement de douglas et l'atmosphère en fonction de l'âge du peuplement  
**Source :** Simon M et al. 2018. *Projet Evafora, ADEME.*  
 D'après Paul-Limoges E et al. 2015, *Agricultural and Forest Meteorology* 203:30-42.

L'étude suivante, porte sur 432 forêts tempérées du monde, et prend en compte l'ensemble du sol en comparant des zones qui font l'objet de récoltes régulières avec des zones sans récolte depuis plus de 30 ans. Elle montre qu'en cas de récoltes régulières, le taux de carbone dans le sol diminue de 10%.

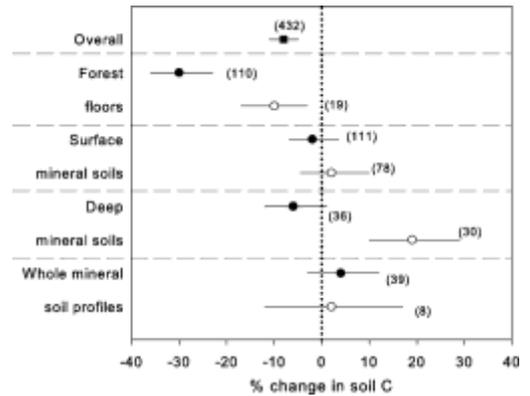


**Légende :** Silt + clay (%) : limon + argile  
 Organic carbon content (%) : teneur en carbone organique (%)  
**Source :** Magdoff F. & Weil R.V. 2004. *Soil organic matter in sustainable agriculture.* Boca Raton, CRC Press.

### Gestion et carbone du sol

Contrairement à ce qu'on croit très souvent, les premières années qui suivent une plantation, ont un bilan carbone négatif, comme le montre le graphique suivant. En effet, les travaux d'installation de la plantation ont bouleversé le sol, activé les micro-organismes et fait entrer de l'oxygène dans le sol, entraînant plus d'exportation de carbone que de stockage. Ceci pour un laps de temps généralement compris entre 5 et 15 ans, en fonction des pratiques culturales et du type de sol.

**Différence entre sites récoltés et non récoltés (depuis au moins 30 ans) pour 432 forêts tempérées dans le monde**



**Légende :** Overall : sol total – Forest floors : horizons organiques de surface – Surface mineral soils : sol organo-minéral superficiel – Deep mineral soils : sol organo minéral profond. whole mineral soil profiles : ensemble du profil - % change in soil C : Variation en % du C du sol  
**Source :** Nave E. et al. 2010. *Forest Ecology and Management* 259: 857-866

## Production primaire nette et CO<sub>2</sub>

Avec le changement climatique, le taux de CO<sub>2</sub> s'accroît dans l'atmosphère.

Il se trouve que, quand on parle de photosynthèse, deux types sont importants pour nous : les photosynthèses C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> (C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> désignent le nombre d'atomes de carbone dans les premiers composés stables issus de la photosynthèse).

Pour la photosynthèse C<sub>3</sub>, le végétal a besoin de beaucoup de CO<sub>2</sub> pour exprimer tout son potentiel de croissance.

Or il se trouve que les arbres sont des plantes en C<sub>3</sub>, ce qui laisserait croire que les arbres pousseront plus à l'avenir puisqu'il y aura davantage de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère !

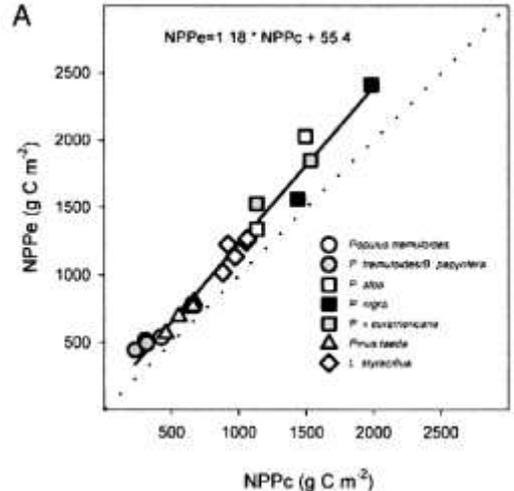
Une aubaine pour les forestiers. Mais, sur le plan physiologique, il reste à confirmer que ce qui marche au niveau de la photosynthèse dans une serre se vérifie sur le terrain, où il existe beaucoup d'autres contraintes.

### FACE (free air carbon experiment): expériences sur le carbone à l'air libre

Dans certaines expériences de terrain, des scientifiques ont injecté du CO<sub>2</sub> pendant 10 années sur des cultures de végétaux en plein air. Le schéma ci-après montre la réponse en termes de production de matière (production primaire nette) de diverses plantations ligneuses en situation de CO<sub>2</sub> élevé comparée à une situation en CO<sub>2</sub> normale.

S'il n'y a pas de réponse, on est sur la bissectrice (courbe en pointillé). Or, tous les points sont au-dessus de la bissectrice : clairement, dans ces expériences, les arbres se sont développés plus rapidement quand la disponibilité en CO<sub>2</sub> a été augmentée.

Dans des conditions naturelles, l'enrichissement de l'atmosphère en carbone pourrait donc avoir un effet positif sur la croissance des végétaux, ce qui est plutôt une bonne nouvelle en matière de production de bois et de séquestration de CO<sub>2</sub>.



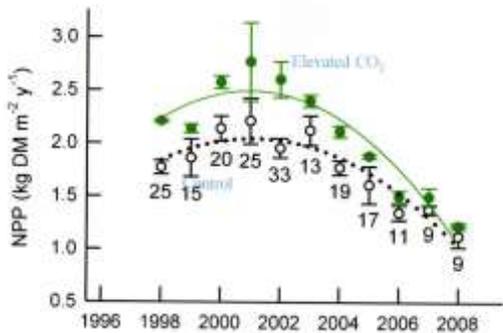
Relation entre la NPP à CO<sub>2</sub> élevé (NPPe) et la concentration actuelle de CO<sub>2</sub> (NPPc) dans 4 expériences FACE en forêt.

La relation entre NPPe et NPPc est supérieure à la ligne 1:1, indiquant un effet significatif du CO<sub>2</sub> sur la NPP.

Augmentation de 23 % de la PPN à 550 ppm de CO<sub>2</sub>.

Source : Norby R.J. et al. 2005. PNAS 102 : 18052-18056.

Mais, combien de temps dure cet effet positif du CO<sub>2</sub> sur la croissance ? Une expérience FACE menée sur 12 ans (schéma ci-après), montre que l'écart entre le témoin et le traitement en CO<sub>2</sub> enrichi s'amenuise au cours du temps, pour disparaître au bout de 12 ans. De fait, l'effet bénéfique du CO<sub>2</sub> sur la croissance n'est pas durable. Ce ralentissement de la stimulation de la croissance est dû à l'augmentation de l'accès de l'arbre au carbone-CO<sub>2</sub>, ce qui génère une demande supplémentaire en éléments minéraux et à un relatif épuisement du sol en azote, phosphore, etc. La question de la fertilité du sol va donc se poser de façon très forte : faudra-t-il fertiliser pour que les arbres puissent profiter de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ?



**Légende :** Réponse de la croissance des arbres au  $\text{CO}_2$  élevé par mètre carré de surface terrestre et par an. Les données sont les moyennes de trois parcelles  $a\text{CO}_2$  (symbole ouvert) et de deux parcelles  $e\text{CO}_2$  (symboles pleins) + SEM.

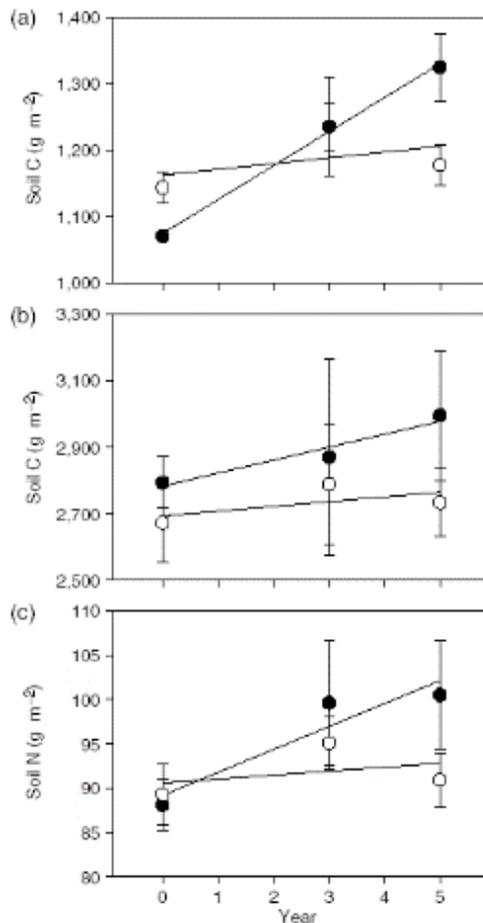
Le nombre à chaque point est le pourcentage d'augmentation sous  $e\text{CO}_2$ . Les informations statistiques sont données dans SI Materials and Methods

**Source :** Norby R.J. 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 19368-19373

À propos de la fertilisation, rappelons que la source d'azote est l'atmosphère, et que la fabrication de l'engrais azoté, à partir de l'azote  $\text{N}_2$  de l'air, est très onéreuse en énergie. Il n'y a rien à dire si l'on utilise une source d'énergie renouvelable ; par contre, si l'on utilise une source d'énergie fossile, on aggrave la situation en libérant du carbone. En ce qui concerne le phosphore, la situation est plus délicate car c'est une roche fossile. L'agriculture française repose à 100 % sur l'importation de phosphate. Les géochimistes tirent la sonnette d'alarme depuis longtemps, car à la fin du siècle nous connaissons de gros problèmes d'approvisionnement en une matière qui n'est pas renouvelable. Donc soyons prudents dans son utilisation.

## Dynamique du carbone dans l'écosystème

Si la production s'amplifie puisque le  $\text{CO}_2$  augmente, nous aurons logiquement davantage de carbone dans le sol. Mais est-ce vrai ? Toujours dans une expérience FACE, la teneur en carbone organique du sol a été suivie pendant 5 ans. Sur des carottes de sol prélevées entre 0 et 15 cm de profondeur, aucun changement n'est détectable, il faut réduire la carotte à 5 cm de profondeur pour voir un accroissement significatif du taux de carbone dans le sol.



Réponse au  $\text{CO}_2$  élevé (550 ppm) du carbone du sol dans une forêt de gommiers (*Liquidambar styraciflua*) établie en 1988. Expérience FACE à Oak Ridge

**Source :** Jastrow J.D. et al. 2005. *Global Change Biology* 11: 2057-2064.

En d'autres termes, l'augmentation de productivité des arbres engendrée par l'élévation en  $\text{CO}_2$  a tout juste commencé à avoir un effet sur le carbone du sol. Le carbone du sol varie lentement, en dessous d'un certain délai il est pratiquement impossible de constater un enrichissement quelconque.

## Température et productivité

Dans la nature, la situation est plus compliquée, car en plus du CO<sub>2</sub>, de nombreux autres facteurs jouent, dont la température, rendant les prévisions statistiques très difficiles. Mais on a pu montrer que dans certains cas, c'est bien le changement climatique lui-même qui engendre des changements de productivité végétale. Ainsi, pour un accroissement de la température moyen-ne de 1,5-1,7°C, la productivité augmente en raison d'un changement de taux de croissance des arbres. Pour un accroissement de 3,6-4,0°C, le changement de production est dû à un changement de taux de croissance des arbres dans les climats tempérés, et à un changement de composition spécifique du peuplement d'arbres dans les climats chauds et froids.

Plus la température augmentera, plus elle jouera sur le changement d'espèces. Toutefois, nous ne sommes pas encore très avancés dans la compréhension des mécanismes d'évolution du carbone dans le sol.

RESEARCH PAPER

WILEY

Climate change impacts on long-term forest productivity might be driven by species turnover rather than by changes in tree growth

Raúl García-Valdés<sup>1,2,3</sup> | Alba Estrada<sup>4,5</sup> | Regan Early<sup>6</sup> | Veiko Lehsten<sup>7,8</sup> | Xavier Morin<sup>9</sup>

**Légende :** l'impact du changement climatique sur la productivité forestière à long terme pourrait être déterminé par le changement d'espèces plutôt que par des changements dans la croissance des arbres.

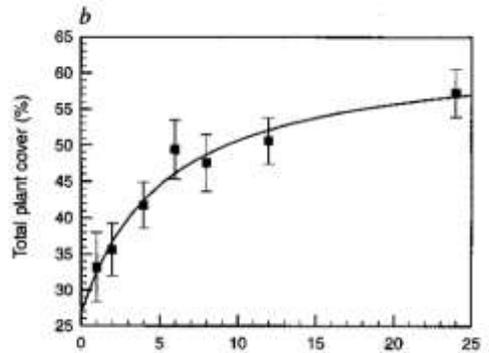
## LA BIODIVERSITÉ UN ATOUT POUR L'AVENIR

### Biodiversité et productivité

La conférence de Rio, en 1992, a lancé le concept de biodiversité, ce qui équivaut à répondre à la question : quelle est la valeur de la variabilité du vivant par rapport à l'humanité ?

Pour y répondre, aux États-Unis, on a créé des parcelles expérimentales afin de suivre la

production des prairies en fonction du nombre d'espèces végétales les constituant. L'expérience démontre que si l'on augmente la biodiversité, c'est-à-dire le nombre d'espèces, on augmente la productivité de la prairie, mais la courbe forme un plateau au-delà d'un certain nombre d'espèces. Cette relation se maintient d'une année sur l'autre, mais les interactions entre les espèces se modifient avec le temps. Par exemple, l'espèce a, qui contribuait à la moitié de la production herbacée la première année, peut régresser fortement ensuite en raison de perturbations (grand froid, sécheresses, maladies...) au profit d'autres espèces qui subissent désormais moins de compétition pour l'accès aux ressources et se développent donc d'autant mieux, relayant en quelque sorte l'espèce a.



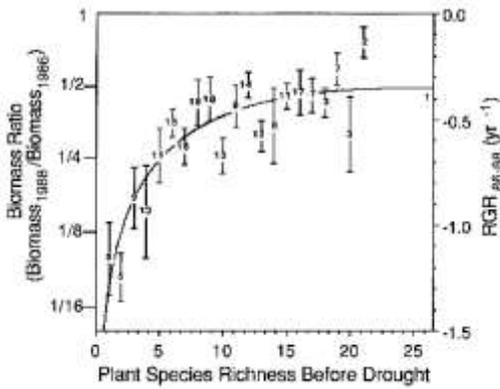
Nombre d'espèces de graminées

Source : Tilman D. 1996, *Ecology* 77: 350-363

### Biodiversité et résistance

Dans ces mêmes prairies d'Amérique du Nord, les scientifiques se sont posé la question de la résistance de l'écosystème aux perturbations : ils ont laissé des parcelles en situation de sécheresse et les ont comparées avec des parcelles témoins arrosées.

Le résultat est clair : plus vous avez d'espèces présentes en situation de sécheresse, plus la productivité se rapproche de celle du témoin irrigué. Et, comme dans l'expérience précédente, la courbe atteint un plateau au-delà d'un certain nombre d'espèces.



Production en fonction du nombre d'espèces en condition de sécheresse

Source : Tilman D. 1996, *Ecology* 77: 350-363

De la constatation précédente, il découle que plus vous avez d'espèces, plus vous gagnez en « sécurité », plus l'écosystème est capable de supporter des perturbations.

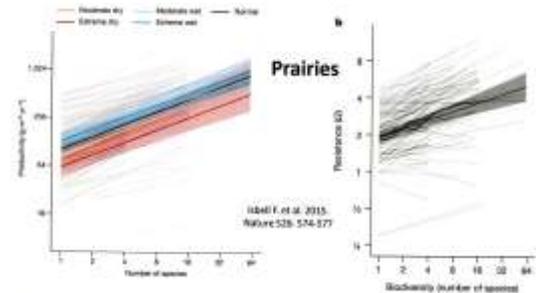
Cet effet du nombre d'espèces sur la capacité à répondre aux perturbations a été théorisé en tant qu'assurance biologique, car la multiplication de la biodiversité augmente le nombre de réponses possibles à des changements d'environnement variés et souvent imprévisibles.

### Quelle signification ?

Depuis, d'autres études ont été menées pour savoir si ces premiers résultats étaient généralisables, et, dans ce cas, pouvaient être utilisés pour « cadrer » des actions.

Concernant les prairies, cf. le schéma ci-après, ces résultats sont confirmés, aussi

bien pour la productivité que pour la résistance. Plus on a de biodiversité, plus la production est importante et la résistance à la sécheresse intense. Ces relations peuvent donc être considérées comme généralisables à tous les écosystèmes herbacés.



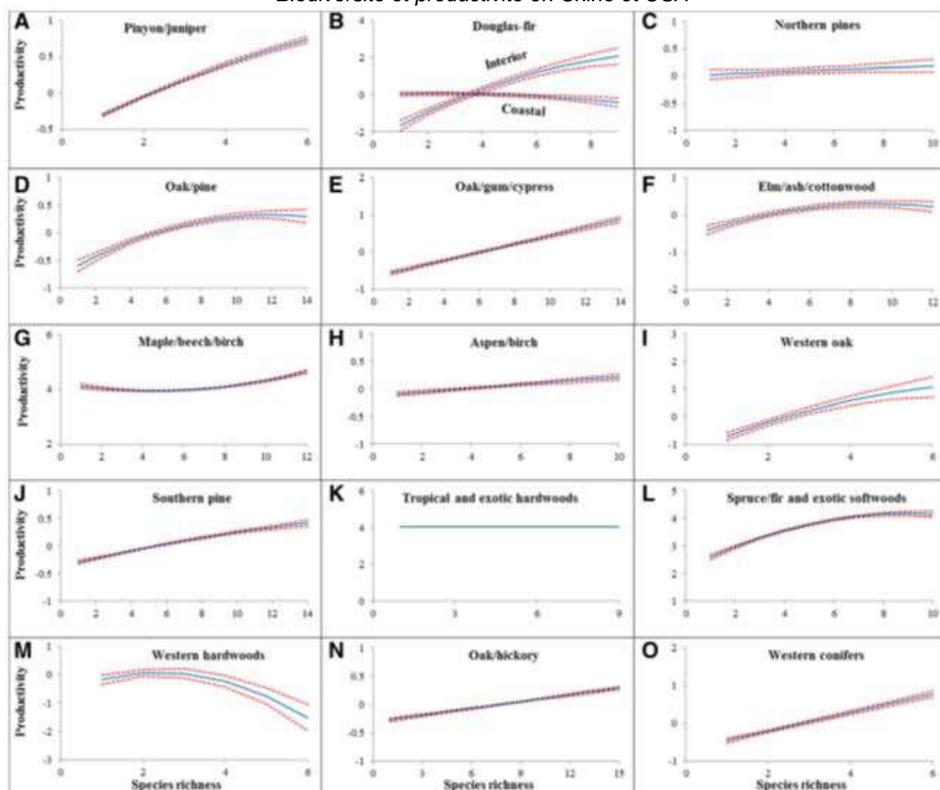
**Légende du schéma de gauche :** modérément sec (orange) – extrêmement sec (marron) - modéré humide (bleu clair) – humide extrême (bleu foncé) - Normal  
Source : Isbell F. et al. 2015. *Nature* 526: 574-577

### Biodiversité et productivité en forêt

En ce qui concerne les forêts, on peut prédire que la relation biodiversité-productivité-résistance est la même, mais les expérimentations sont encore rares, car compliquées, longues et difficiles.

Le graphique ci-après donne les résultats d'observations menées aux USA et en Chine, pour différents nombres d'espèces en mélange, compris entre 6 et 12. Les corrélations obtenues sont le plus souvent positives, mais il y a quelques exceptions.

## Biodiversité et productivité en Chine et USA



**Légende :** A : genévrier à pignon – B : douglas – C : pin du nord – D : chêne/pin – E : chêne/gommier/cyprès – F : orme/frêne/cotonnier – G : tilleul/hêtre/bouleau – H : bouleau/tremble – I : chêne occidental – J : pin du sud – K : bois durs tropicaux et exotiques – L : épicéa/sapin et bois exotiques tendres – M : feuillus occidentaux – N : chêne/caryer – O : conifère occidental.

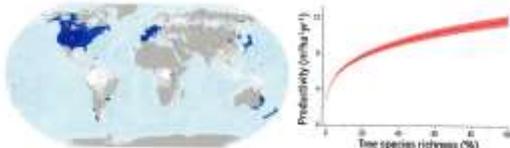
**Source :** Watson et al. 2015. *Forest Ecosystems* 2: 22

## Biodiversité et productivité

L'étude précédente date de 2015. Depuis, une étude gigantesque en termes d'échantillonnage a été réalisée en compilant la littérature sur les forêts du monde, avec près de 800 000 points d'observations de données.

Il ressort de cette étude une relation positive entre la richesse en espèces, c'est-à-dire la biodiversité, et la productivité, dans quasiment toutes les forêts du monde.

On peut donc dire que pour les forêts, le lien biodiversité/productivité est très probable, mais pas encore formellement démontré. Ce n'est sans doute qu'une question de temps !



**Légende :** effet global de la diversité des espèces d'arbres sur la productivité des forêts. Les données recueillies sur le terrain à partir de 777 126 placettes d'échantillonnage permanentes de la biodiversité forestière mondiale (point bleu foncé, sur la carte à gauche), qui couvrent une partie importante de l'étendue des forêts mondiales (blanc), révèlent une relation positive cohérente et concave vers le bas entre la biodiversité et la productivité dans toutes les forêts du monde (ligne rouge avec une bande rose représentant l'intervalle de confiance à 95 %, à droite).

Liang J. et al. 2016. *Science* 354

**Source :** Liang J. et al. 2016. *Science* 354

## Biodiversité et pathogènes

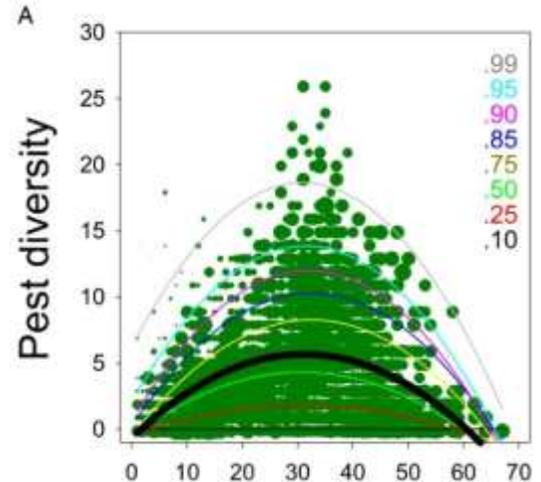
Une autre étude intéressante a été entreprise aux États-Unis, sur 130 000 points, pour observer le lien entre le nombre d'espèces d'arbres (jusqu'à 65 pour les zones les plus riches) et les « pathogènes ».

Jusqu'à 35 espèces d'arbres, plus vous avez de diversité, plus vous avez de pathogènes. A priori, ces derniers sont plus ou moins liés à une espèce d'arbre, donc plus il y a d'espèces d'arbres, plus il y a de pathogènes. Par contre, au-delà de 35 espèces d'arbres, plus la biodiversité est importante, plus le nombre de pathogènes diminue. Cela s'explique par la densité de chaque espèce d'arbre, car au-delà de 35 essences, chaque individu d'une espèce d'arbre donnée est

éloigné de son voisin, ce qui gêne et diminue la diffusion du pathogène.

On observe le même principe en agriculture.

La diversité peut donc permettre une certaine résistance à la propagation des pathogènes.



Diversité des parasites (Pest diversity) et diversité des arbres sur 130 210 parcelles forestières aux États-Unis

**Source :** Guo Q. et al. 2019. *PNAS* 116: 7382-7386

## Répartition spatiale

Le dernier point que je souhaitais évoquer est la structure spatiale. Dans nos pays où les forêts sont gérées, les peuplements tendent vers une certaine homogénéité, ce qui n'est pas le cas des forêts naturelles, telle celle représentée dans le schéma ci-après (2,5 ha d'une forêt primaire de Sumatra). Leur cas est intéressant car elles ont intégré toute la mécanique des interactions décrites en amont. On y observe une mosaïque de différents statuts (clairières, jeunes bois, adultes, sénescents, etc...), ce qui a deux conséquences :

- ⇒ la première est que chaque stade (taches de quelques centaines de m<sup>2</sup>), connaît une biodiversité particulière, ce qui signifie qu'en termes de diversité régionale, vous avez une valeur maximale ;
- ⇒ la seconde est une capacité de régénération phénoménale, car les plantes qui pourront coloniser une clairière qui s'ouvre se trouvent à proximité immédiate (100 m au plus).

Donc l'hétérogénéité spatiale peut être une direction intéressante à suivre pour essayer d'obtenir des forêts résilientes.



*Sungai Mahato, Riau, Sumatra, Indonésie*

**Source** : Puig H. 2001. *La forêt tropicale humide*. Belin, Paris



*Alexandra d'Harcourt et Luc Abbadie*  
*Cliché Ch. Allegrini*

**Luc Abbadie**