

Réévaluation de la place des plantes cultivées dans le bilan carbone mondial

Reappraisal of the place of cultivated plants in the carbon budget

Arnaud Muller-Feuga^{1*}

¹ AMF Conseil

*Auteur correspondant arnaud.muller-feuga@wanadoo.fr

Le 25 août 2025

Résumé

L'impact de l'agriculture sur le CO₂ atmosphérique reste sous-estimé en raison de l'exclusion systématique des cultures annuelles dans les bilans carbone. Jugées trop éphémères, ces cultures sont pourtant responsables de l'absorption et du stockage d'environ un tiers du carbone biofixé par photosynthèse avec des demi-vies qui ne se limitent pas à une saison, mais s'étendent en moyenne sur 8,9 années. La cinétique de variation des captages et restitutions de carbone par les plantes cultivées sur le demi-siècle a été simulée pour compléter le calcul probabiliste des éléments du bilan carbone, et notamment des captages intermédiaires et des restitutions par minéralisation des biomasses produites. En 2023, la demi-vie du carbone stocké par l'ensemble des plantes cultivées – cultures, prairies et plantations forestières – était de $17,6 \pm 0,7$ années. Les plantes cultivées avaient capté $39,2 \pm 0,5$ milliards de tonnes de CO₂ (GtCO₂) par an, soit plus que les émissions mondiales par combustion d'hydrocarbures fossiles, dont 82 % étaient compensés par ce puits anthropique net de $-31,0 \pm 1,9$ GtCO₂. La répartition dans le temps que permet cette simulation suggère que les plantes cultivées ont absorbé un total net cumulé de $123,3 \pm 3,9$ milliards de tonnes de carbone en 2023, soit 14% de l'atmosphère. Devant l'importance de cette contribution en durée comme en quantité, les activités rurales devraient être intégrées dans les bilans carbone pour définir les stratégies climatiques qui en résultent. Cette reconnaissance permettrait de rémunérer à sa juste valeur le travail des agriculteurs et des forestiers dans le cadre de la transition écologique, notamment à travers des mécanismes de rémunération tels que les crédits carbone.

Mots-clés : CO₂, agriculture, foresterie, bilan carbone, océan, cultures annuelles

Abstract

The impact of agriculture on the atmospheric CO₂ remains underestimated due to the systematic exclusion of annual crops from carbon budgets. Considered too ephemeral, these crops are nevertheless responsible for the absorption and storage of approximately one-third of the carbon biofixed by photosynthesis, with half-lives that are not limited to a single season but extend on average over 8.9 years. The kinetics of variation in carbon capture and release by cultivated plants over the half-century were simulated to complete the probabilistic calculation of the carbon budget components. In 2023, all cultivated plants (crops, grasslands, and forest plantations) had a stored carbon half-life of 17.6 ± 0.7 years. They had removed 39.2 ± 0.5 billion metric tons of CO₂ (GtCO₂) per year from the atmosphere, more than global emissions from hydrocarbon combustion of which 82% was offset by this net

anthropogenic sink of -31.0 ± 1.9 GtCO₂. The time distribution allowed by this simulation suggests that cultivated plants have absorbed a cumulative net stock of 123.3 ± 3.9 billion metric tons of carbon (GtC) in 2023, or 14% of the atmosphere. Given the importance of this contribution both in duration and quantity, rural activities should be integrated into carbon budgets to define resulting climate strategies. This recognition would allow for the fair reward of the work of farmers and foresters as part of the ecological transition, particularly through remuneration mechanisms such as carbon credits.

Keywords : CO₂, agriculture, forestry, carbon budget, ocean, annual crops

Abbreviations

COP	conference of the parties
DOE	Department of Energy
GCDL	Global Change Data Lab
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MLO	Mauna Lao observatory
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONU	Organisation des Nations Unies
PIB	Produit intérieur brut
PNUE	Programme des Nations unies pour l'Environnement

Notations

AW	absorption par les plantes cultivées
Co	contribution océanique
CP	captage photosynthétique
CSC	captage et stockage de carbone
CSCP	captage et stockage de carbone par les plantes
DLC	durée limite de consommation
EFOS	émissions par combustions fossiles
EW	émissions issues des plantes
DSC	demi-vie de stockage du carbone
PPO	production primaire océanique
RM	restitution par minéralisation
TAC	teneur atmosphérique en CO ₂
VCA	variation de la masse de CO ₂ atmosphérique
VTAC	variation de la teneur atmosphérique en CO ₂

Unités

ppm	partie par million. 1 ppm de CO ₂ = 7,84 GtCO ₂
M	méga (10 ⁶)
MtCO ₂	million de tonnes de gaz carbonique
MtC	million de tonnes de carbone
G	giga (10 ⁹)
Gan	milliard d'années

GtCO ₂	milliard de tonnes de gaz carbonique
GtC	milliards de tonnes de carbone
GtO ₂	milliard de tonnes de dioxygène
c	habitant
ha	hectare (100 m * 100 m = 10 000 m ²)
ka	kilo an – 1000 ans
Ma	million d'années
T	téra (10 ¹²)
TgC	téra (10 ¹²) grammes de carbone = MtC
P	péta (10 ¹⁵)
PgC	péta (10 ¹⁵) grammes de carbone = GtC
W/m ²	Watt par mètre carré

Introduction

L'évolution du climat terrestre est depuis longtemps le sujet d'une attention particulière. Les décideurs s'efforcent d'identifier les facteurs les plus influents afin de prévoir leur évolution et d'agir sur eux lorsque c'est possible, notamment s'ils font encourir des risques à l'humanité. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, IPCC en anglais) a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Il a pour mandat d'évaluer de façon impartiale les informations internationales scientifiques, techniques et socio-économiques sur l'évolution du climat. Depuis son premier rapport en 1990, et de manière régulière environ tous les 5-6 ans, le GIEC délivre un rapport de synthèse qui résume les contributions de trois groupes de travail mobilisant des centaines de spécialistes. Ces rapports d'évaluation tiennent lieu de référence pour les scientifiques et les décideurs du monde entier et sont à l'origine des politiques conduites par la plupart des pays de l'OCDE et de l'Union Européenne.

Cette production scientifique au cœur des négociations internationales sur le climat a pour objet d'alerter les décideurs et la société civile. Depuis la création du GIEC, tous ses rapports ont été adoptés en séance plénière par l'ensemble des 192 pays représentés. Le budget annuel du GIEC d'environ cinq millions d'euros en 2012, est passé à six millions d'euros en 2021. Il est financé par les 195 États membres de l'ONU qui contribuent de « manière indépendante et volontaire ». Plusieurs centaines de scientifiques participent à l'élaboration des rapports qui présentent la situation de l'évolution climatique comme la conséquence des émissions notamment de gaz carbonique et recommandent des restrictions contraignantes de l'usage des combustibles fossiles.

Le réchauffement planétaire en cours depuis un demi-siècle au rythme de 0,19 °C tous les 10 ans (Met Office Hadley Centre, 2024) serait un processus de type effet de serre et la conséquence du rejet à l'atmosphère du CO₂ produit par la combustion des hydrocarbures fossiles depuis le début de l'ère industrielle. La teneur atmosphérique en CO₂ (TAC) est passée de 270 parties par million en volume (ppm) au milieu du 19^{ème} siècle à 420 ppm. Cette augmentation semble due au rejet à l'atmosphère des produits de la combustion des hydrocarbures fossiles, charbon, pétrole, gaz, qui s'est intensifiée depuis. L'augmentation des températures mondiales constatée sur la même période serait due à ces émissions qui sont présentées comme une pollution.

Selon les scénarios les plus récents qui tablent sur l'hypothèse d'un réchauffement de 1,5°C, le niveau moyen des mers pourrait connaître, une élévation située entre 0,26 et 0,77 m d'ici à la fin de ce siècle. Une telle élévation serait préjudiciable aux populations vivant sur les côtes basses. Des mesures fortes devraient être prises rapidement pour éviter qu'au cours des prochaines décennies l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique ne provoque un bouleversement climatique planétaire durable. D'après le 5^{ème} rapport, un doublement de la TAC provoquerait une élévation de 2,8°C de la température moyenne de la troposphère, actuellement de 14,5°C. Cet échauffement moyen est important comparé à celui qui suit une glaciation, lequel est de 4°C.

La plupart des gouvernements ont adhéré à ce point de vue et renouvellent leur approbation à l'occasion des COP (Conference of the Parties) annuelles. Une des conséquences est l'attribution de permis d'émission négociables à ne pas dépasser sous peine de pénalité (protocole de Kyoto - 1997) dans le cadre d'un marché mondial du carbone. Dans le but de se rapprocher de la neutralité, les activités émettrices sont incitées à acheter de tels permis à celles qui réalisent le captage et le stockage du carbone (CSC – CCS en anglais) émis, évité, ou prélevé directement dans l'atmosphère. Les sites émetteurs de plus de 0,1 millions de tonnes de CO₂ par an (MtCO₂/an) doivent compenser leurs émissions par un dispositif de CSC ou acheter des permis d'émission ou crédits carbone.

Le CSC par enfouissement géologique pour plusieurs siècles est retenu par la plupart des pays industrialisés pour accéder à la neutralité carbone en 2050. Il apparaît comme le moyen de remplir les promesses faites par les gouvernements et renouvelées à l'occasion des COP successives. Si l'agenda n'est pas conforme et les promesses ne sont pas tenues, des pénalités sont prévues. Mais il advient que des pays dénoncent les accords contraignants signés antérieurement, comme ce fut le cas du Canada qui a dénoncé le protocole de Kyoto en 2011.

Le développement du CSC par enfouissement est parfois perçu comme compatible avec la poursuite de l'usage des combustibles fossiles, ce qui soulève des interrogations sur sa contribution réelle à la neutralité carbone. Son principe est très critiqué par ceux qui voudraient « décarboner » l'économie mondiale. Ils considèrent le CSC et les quotas de permis d'émission comme des droits à polluer. Le captage et le stockage du carbone dans les produits végétaux commercialisés par les cultures, l'élevage et la foresterie, ont été estimés sur la base des statistiques de la FAO (s.d.), (Muller-Feuga, 2024a) à 21 milliards de tonnes de CO₂ (GtCO₂ ou PgCO₂) par an en 2022. Par la suite, les parties non commerciales portant ces productions ont été prises en compte (Muller-Feuga, 2024b), ce qui a porté le captage et le stockage du carbone par les plantes entières cultivées (CSCP) à 41,0±0,6 GtCO₂/an et la durée moyenne de stockage pondérée par le poids sec à 26,3±2,0 ans en 2022. Ces chiffres étaient très supérieurs à ceux de la littérature : 3,2 fois le puits continental de Friedlingstein et al. (2022) évalué à 12,8±3,3 GtCO₂/an, et 2,1 fois celui de Pan et al. (2024) évalué à 19,8 GtCO₂/an. L'analyse a été complétée par celle de l'évolution sur 50 ans (Muller-Feuga, 2025) des CSCP et des restitutions par respiration et combustion auxquelles ils donnent lieu. Elle a montré que la culture des plantes constitue un puits moyen de 39,9 GtCO₂/an prélevés dans l'atmosphère pendant les dix années précédant 2022, plus que les 36 GtCO₂ émis par la combustion d'hydrocarbures fossiles. Elle a montré également que l'océan mondial est une source croissante de 10,6 GtCO₂/an en moyenne pendant la dernière décennie.

Ces différences semblent être dues à l'absence de prise en compte des cultures annuelles dans les bilans carbone. Nous avons relevé une disposition spécifique dans le document décrivant

les méthodes et les lignes directrices (GIEC, 2006a et 2006b) à l'intention des chercheurs. Au chapitre 5 : « Terres cultivées », il est indiqué : « *L'évolution de la biomasse n'est estimée que pour les cultures ligneuses pérennes. Pour les cultures annuelles, l'augmentation des stocks de biomasse au cours d'une seule année est supposée égale aux pertes de biomasse dues à la récolte et à la mortalité au cours de la même année ; il n'y a donc pas d'accumulation nette de stocks de carbone de biomasse* ». Ceci est confirmé par l'édition 2019 des lignes directrices (IPCC, 2019). Parmi les végétaux cultivés, il est recommandé explicitement de ne considérer que les cultures ligneuses pérennes telles que thé, café, palmier à huile, noix de coco, hévéas, fruits et noix, et les polycultures telles que les systèmes agroforestiers (e.g. Walker et al., 2021). Cela réduit considérablement la part des végétaux entrant dans les bilans carbone à l'origine de la politique de préservation du climat. Pourtant, le carbone reste inclus dans la biomasse végétale pendant les quelques mois à quelques siècles qui séparent le début de la croissance de la minéralisation par digestion ou combustion provoquant son retour à l'atmosphère sous forme de CO₂.

Cette exclusion des plantes annuelles sous prétexte que leur carbone est rapidement libéré ne correspond pas à la réalité, sauf dans le cas très rare où la culture est brûlée. Même dans cette situation extrême, les parties souterraines, qui représentent une part substantielle de la biomasse, persistent pendant plusieurs décennies. La mort de la plante annuelle après la récolte n'implique pas la disparition du carbone qu'elle a accumulé. Les céréales, dont le maïs, le blé et le riz soit un peu moins de la moitié des productions agricoles mondiales, ont des durées de stockage quasiment infinie dans les conditions adéquates d'hygrométrie et de température sous forme de grains ou celle transformée de biscuits, pâtes et nouilles. Outre la stabilisation des prix, ceci permet leur transport sur les longues distances et la constitution de réserves stratégiques pour les populations soumises à des crises ou éloignées des zones de production.

D'après le Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales (FAO, 2025), les prévisions mondiales de production s'élevaient à 2 849 millions de tonnes en 2024 qui ont capté 3,8 GtCO₂/an pris dans l'atmosphère. Les prévisions d'utilisation 2024-2025 devraient être de 2 868 millions de tonnes. À la fin des campagnes 2025, les stocks mondiaux de céréales devraient s'établir à 873,3 millions de tonnes. Le rapport stock/utilisation de 30,1% laisse attendre une rotation sur 3 ans environ.

Pour le riz, qui est la principale céréale asiatique, le stock de clôture de chaque campagne de production représente 1/3 de l'utilisation, ce qui permet de maîtriser les prix mondiaux (FAO, 2018). Cela suppose une rotation complète au moins tous les 3 ans. Le Japon, a récemment ouvert ses réserves stratégiques de riz pour faire face à l'envolée des prix qui ont presque doublé à la suite de la mauvaise récolte de 2023. Sur un total d'environ un million de tonnes, 210 000 tonnes sont écoulées (The Mainichi, 2025). C'est la première fois depuis leur création en 1995 que ces réserves sont entamées, soit une durée de stockage de 30 ans.

Plus généralement, l'indice mondial des prix à la consommation du riz montre une tendance haussière persistante qui incite les états à importer et à constituer des réserves. L'exemple du Sahel montre à quel point les réserves alimentaires sont une composante importante de la sécurité alimentaire mondiale. Le nombre de personnes sous-alimentées dans le monde était de 733 millions en 2023, soit 9,1% de la population mondiale (FAO, 2024). La rotation des réserves alimentaires mondiales est un enjeu stratégique qui nécessite une attention particulière pour garantir la sécurité alimentaire et faire face aux crises actuelles et futures.

Grâce à leurs capacités intrinsèques et aux techniques de conservation, les stocks constitués par les plantes annuelles subsistent bien au-delà de l'année de récolte, et il n'y a pas de justification apparente pour les exclure des bilans carbone compte tenu de l'importance de leur contribution. Les plantes cultivées fixent le gaz carbonique de l'atmosphère et constituent un dispositif de CSC tant par leurs quantités que par leurs durées. Nous apportons ici les mises à jour et corrections nécessaires et en examinons leurs conséquences.

Matériel et méthodes

1. La photosynthèse

Les plantes réalisent le captage direct du CO₂ atmosphérique, puis la polymérisation du carbone en biomasse selon le processus de photosynthèse à l'origine de la vie apparu sur terre il y a 2,5 milliards d'années. La matière carbonée ainsi obtenue nourrit les hétérotrophes qui la dégradent par respiration. Elle est également minéralisée par fermentation, inflammation et combustion. Ces réactions de polymérisation et de minéralisation sont regroupées sous la même équation chimique réversible (1).



E est l'énergie lumineuse visible dans le sens de la photosynthèse (de la gauche vers la droite) et l'énergie métabolique ou de combustion dans le sens de la respiration (de la droite vers la gauche). Cette équation exprime que la consommation de CO₂, la production d'oxygène et la production de matière organique sous forme d'hexoses se correspondent molécule pour molécule.

La photosynthèse met en œuvre des processus enzymatiques en chaîne impliquant notamment l'anhydrase carbonique et la rubisco pour l'entrée de ce gaz dans la cellule végétale, puis une série de réactions modulées par la lumière visible. Il manque à la réaction (1) d'autres éléments assimilables indispensables mais mineurs comme l'azote, le phosphore, le fer, etc. Elle est toutefois retenue ici parce que nous limitons notre analyse au carbone.

L'hexose est la brique élémentaire de la matière végétale, et sa quantité peut être mesurée par celles des biomasses végétales sèches (ms) selon la stœchiométrie de la réaction chimique (1). Le ratio carbone / matière sèche (C/ms) qu'elle fournit varie en réalité avec le type de biomasse et devrait être ajusté à chaque cas. En effet, il est de 0,40 pour le glucose, 0,44 pour la cellulose, 0,64 pour l'hémicellulose et 0,66 pour la lignine. Malgré cette dispersion et par soucis de simplification conservatrice, nous retenons la valeur de 0,4 fournie par la réaction (1) pour toutes les biomasses. Une tonne de production primaire sous forme de biomasse végétale sèche contient 0,4 tonne de carbone (C/ms) et a nécessité 1,47 tonnes de CO₂ (CO₂/ms) pris dans l'atmosphère. Dans l'autre sens de la réaction, une tonne de matière organique sèche libère 1,47 tonnes de CO₂ lors de sa dégradation minérale par respiration, fermentation ou combustion.

Bien que le rendement de transformation énergétique du rayonnement solaire en biomasse soit de l'ordre de quelques %, la production végétale qui en résulte est un important puits de carbone. Maîtrisant tout ou partie de la chaîne trophique, l'agriculture, l'élevage, la foresterie, la chasse, la pêche et l'aquaculture, nourrissent l'humanité, la vêtissent, la réchauffent, l'abritent, la divertissent, etc... Nous considérons ici la production primaire nette

après respiration autotrophe, de ces activités qui prélèvent le gaz carbonique de l'atmosphère et le stockent sous forme de biomasse. Elles sont à ce titre impliquées dans le cycle du carbone et son bilan.

Il faut distinguer entre le stock et le flux de captage et stockage du CO₂ atmosphérique, le second étant la dérivée par rapport au temps de l'évolution du premier. Dans les bilans annuels, seul le flux est à prendre en compte. Il est proportionnel à la quantité de biomasse végétale produite annuellement, puis récoltée pour être utilisée ailleurs plus tard. A l'inverse, le stock mesuré en tonnes de carbone est la quantité de carbone stockée en un lieu à un instant donné. Seul le flux réalise un système de CSC mesuré en tonnes de CO₂ qui peut être comparé à ceux par enfouissement (Muller-Feuga, 2024a).

2. Le bilan de CO₂ atmosphérique

L'absorption mondiale de CO₂ par la photosynthèse des plantes cultivées (notée AW) et les émissions mondiales de CO₂ par la respiration, la fermentation ou la combustion (notées EW) constituent les composantes végétales des bilans mondiaux de carbone atmosphérique. Elles sont comparées à leurs équivalents issus de la littérature : puits terrestre (noté SLAND) et émissions liées au changement d'affectation des terres (notées ELUC). La variation de la masse de CO₂ atmosphérique (notée VCA) et les émissions par combustion d'hydrocarbures fossiles (EFOS) complètent les échanges de carbone entre les continents, l'atmosphère et les océans. Le bilan de ces échanges est donné par l'égalité (2) qui décrit l'équilibre entre ces quatre composants où les sources sont positives et les puits négatifs. Compte tenu de l'extrême complexité du comportement de l'océan mondial, hétérogène dans les trois dimensions et dans le temps, sa contribution (notée Co) est l'inconnue de cette équation.

$$- VCA - AW + EW + EFOS = Co \quad (2)$$

L'estimation de AW est basée sur la stoechiométrie de la réaction (1) dans le sens de la photosynthèse de la gauche vers la droite, tandis que celle de EW résulte de la même réaction dans le sens de la respiration de la droite vers la gauche. Cette approche est de type comptable et ne fait pas appel aux modèles numériques basés sur les données satellitaires ou mesurées sur le terrain mais seulement aux productions agricoles et forestières déclarées par les gouvernements et rassemblés par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

3. Les durées de captages et stockage

L'histoire du carbone dans les produits agricoles et forestiers se divise entre la période de captage par photosynthèse (CP) et la période de restitution par minéralisation (RM). La récolte marque la transition entre les deux périodes CP et RM. La première période (CP), qui sépare le début de la croissance des plantes, par semis, plantation ou récolte précédente (n-1), de la récolte (n), constitue progressivement le pool de carbone par captage photosynthétique du CO₂ de l'atmosphère. Cette période dure entre quelques mois pour les plantes annuelles et quelques décennies pour les arbres. Comme la croissance pondérale dans le temps des fruits et légumes présente généralement une courbe en S (e.g. Tijero et al., 2021), la quantité de carbone captée et stockée est supposée répartie dans le temps selon une loi de distribution cumulée normale croissante.

Lors de la seconde période (RM) a lieu la minéralisation qui suit la récolte et pendant laquelle le carbone polymérisé est minéralisé et restitué à l'atmosphère sous forme de CO₂ par ingestion alimentaire suivie de digestion et respiration, par fermentation ou par combustion. La matière organique est conservée sur étagère, en vrac, ou dans le sol puis ingérée, fermentée, ou brûlée. Cette période varie entre quelques jours pour les fruits et légumes périssables et quelques siècles pour les bois de charpente et les sols. Comme pour CP, nous supposons que cette émission de CO₂ est répartie dans le temps selon une loi de distribution cumulée normale décroissante.

En attendant des lois probabilistes plus adaptées, la loi normale est choisie ici pour sa continuité, sa facilité de manipulation et son aptitude à bien décrire les phénomènes influencés par de nombreux facteurs, dont aucun n'est prépondérant. La simulation probabiliste de la distribution temporelle du carbone végétal décrite dans Muller-Feuga (2024b) est reprise et mise à jour.

Les lois normales étant centrées, les demi-vies de stockage du carbone (DSC) moyenne et médiane sont égales à la somme de la moitié de la durée maximale de croissance (CP/2) et de la moitié de la durée maximale de restitution (RM/2) selon la formule (3).

$$DSC = (CP + RM) / 2 \quad (3)$$

Pour calculer les durées de stockage et les quantités de CO₂ captées, des hypothèses sont faites concernant les teneurs en eau, les teneurs en protéines, les durées des périodes CP et RM, sur la base des données les plus pertinentes de la littérature. Les quantités de CO₂ captées et restituées sont calculées à l'aide de la formule (3) en déduisant la teneur en eau TE du poids frais fourni par les statistiques. Les durées CP et RM sont affectées à chaque biomasse, puis pondérées par les poids anhydres pour chacun des trois groupes de biomasses, cultures, fourrages et foresterie. La dispersion des résultats est exprimée par leur écart-type (ET), 95,4 % de la population étant incluse dans l'intervalle $\pm 2 \cdot ET$ lorsque la distribution est normale.

Les fruits et légumes fraîchement récoltés ont un délai de transport et mise sur le marché réduit afin de conserver leur goût et leur fraîcheur. Le contrôle de la température pendant le transport et le stockage permet d'augmenter sensiblement la durée séparant la récolte de la consommation. Cette durée de conservation varie de quelques jours à quelques semaines à température ambiante ou au réfrigérateur. Elle peut aller jusqu'à 3 mois, ce qui permet de passer l'hiver. Au congélateur, les aliments se conservent généralement un an et au-delà. Outre la température, la durée de conservation des aliments dépend de leur teneur en eau qui favorise leur décomposition. Cette teneur est variable : 10 à 20% dans les céréales, 60 à 75% dans les viandes et chairs d'animaux, 80 à 90% dans les fruits et légumes frais. La diminution de la teneur en eau permettant de prolonger la durée du stockage peut être réalisée par différentes techniques telles que séchage, saumurage, mise sous vide.

La quantité de CO₂ captée et stockée par un ensemble n de biomasses végétales CS_n de poids frais P_i, est égale à la somme $\sum$ des poids anhydres des récoltes multipliés par le ratio CO₂/ms noté k, conformément à la formule (4), où TE_i est la teneur en eau de la biomasse P_i.

$$CS_n = k \sum_{i=0}^n (1 - TE_i) P_i \quad (4)$$

Les teneurs en eau TE_i documentées par diverses sources croisées permettent de calculer le poids sec P_i de ces produits végétaux par la formule (4). La Figure 1 montre la variation de la durée maximale de restitution RM des produits des cultures mis sur le marché en fonction de leur teneur en eau TE . On distingue les produits frais pour lesquels RM est de quelques jours à quelques mois, les semi conserves pour lesquels RM est de quelques mois à quelques années, et les produits secs pour lesquels RM est de quelques années à indéfiniment.

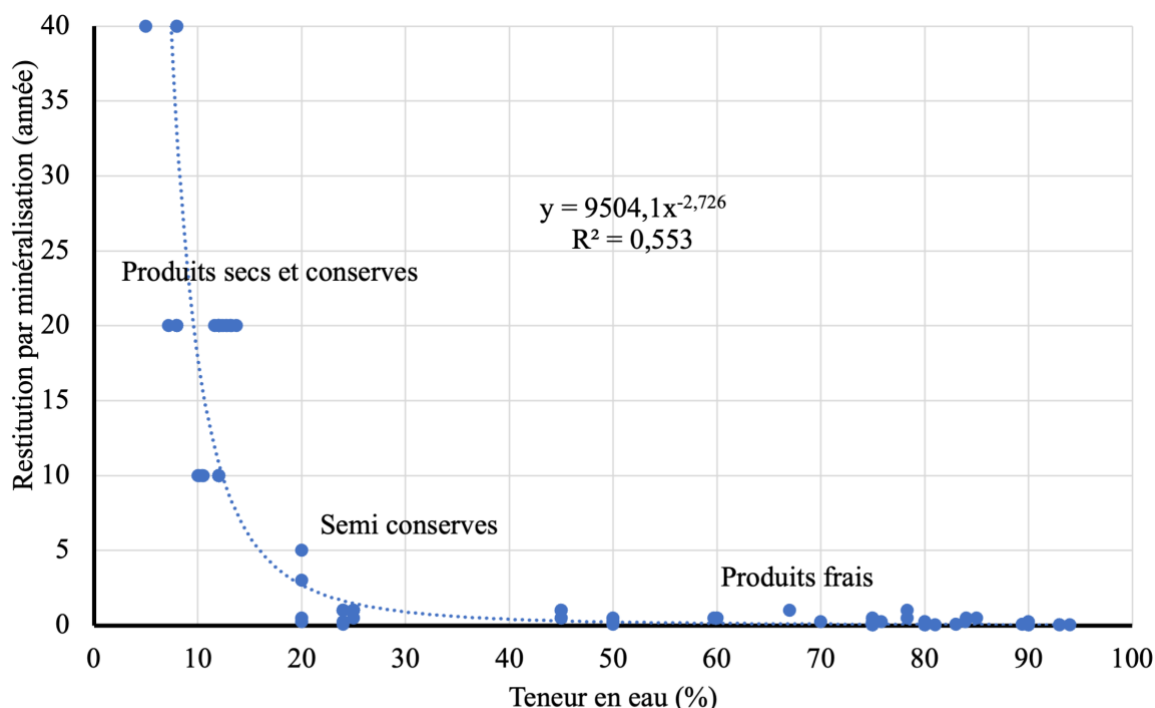


Figure 1 : Durées de restitution récolte RM des produits commerciaux des cultures en fonction de leur teneur en eau en 2023.

La valeur nutritive et l'innocuité sanitaire (fraicheur) des aliments diminuant avec leur âge, le consommateur est guidé dans ses choix pour assurer sa sécurité alimentaire et limiter le gaspillage. Des durées limites de consommation (DLC) sont des mentions obligatoires portées sur les produits alimentaires. Nous avons considéré que nos durées maximales de restitution par minéralisation RM sont égales à ces DLC lorsqu'elles existent.

4. Les quantités capturées et stockées

Les terres émergées sont cultivées pour couvrir les besoins de l'humanité et de son cheptel en plantes alimentaires (céréales, légumes, fruits, ...), textiles (coton, lin, chanvre, ...), d'agrément (tabac, raisin, fleurs, ...), de chauffage et de construction. Nous utilisons dans ce qui suit les statistiques de la FAO (n.d.) relatives aux productions agricoles, d'élevage, forestières, aquacoles et halieutiques. La matière carbonée ainsi obtenue nourrit les animaux et microorganismes qui la minéralisent par digestion et respiration. Une partie est directement minéralisée par combustion volontaire ou accidentelle. Ces productions responsables des

absorptions continentales de CO₂ par photosynthèse AW sont décrites dans Muller-Feuga (2024b) et mises à jour ici en termes de quantités captées et de durées de stockage.

La destination principalement alimentaire des produits de l'agriculture prolonge le stockage de carbone sous la forme de biomasses animales et de leurs déchets dont les teneurs en carbone sont environ de 18 et 9% du poids, respectivement. La durée de vie du carbone animal avant restitution à l'atmosphère par respiration est comprise entre une semaine dans le foie et six semaines dans les cheveux (Tieszen et al, 1983). Les matières fécales sous forme de compost ou de fumier sont minéralisées dans l'environnement avec une durée de vie du carbone estimée à quelques mois. Cette prolongation animale n'est pas prise en compte ici, ce qui minimise la durée de stockage du carbone.

Les durées de vie moyennes du carbone des nécromasses correspondent au temps moyen de résidence du carbone avant la minéralisation par les organismes décomposeurs du sol. Pour les forêts, ces durées de rétention varient entre 0,9 et 152 ans (Wang et al., 2017). Elles augmentent avec la latitude (x4), et diminuent avec la température (x10) et les précipitations (x4). Nous avons retenu les durées des régions tempérées qui réalisent un compromis entre les hautes et les basses latitudes pour lesquelles la durée de résidence maximale du carbone organique est égale à 75 ans pour les sols des forêts exploitées et à 40 ans pour les sols des cultures et prairies (Balesdent et Recous, 1997 ; Pellerin et al., 2019).

5. La simulation des cinétiques

Les équations de distribution normale simulant les cinétiques de captage et restitution du CO₂ atmosphérique sont, pour le captage :

$$C(t,n) = (R\acute{e}c_n / 2) \cdot [1 + \text{erf}\{(t - n + CP/2) / \sigma_c / \sqrt{2}\}] \quad (5)$$

et pour la restitution :

$$R(t,n) = (R\acute{e}c_n / 2) \cdot [1 - \text{erf}\{(t - n - RM/2) / \sigma_r / \sqrt{2}\}] \quad (6)$$

où t est le temps historique en années, n est l'année de récolte, $R\acute{e}c_n$ est le stock de CO₂ atmosphérique capté lors de la récolte de l'année n , erf est la fonction d'erreur de la loi normale centrée, σ_c et σ_r sont les cambrures des courbes ajustées manuellement. Si $t \leq n$, la durée de captage CP s'applique et la fonction erf est ajoutée. Si $t > n$, la durée de la restitution RM s'applique et la fonction erf est retranchée.

Cette simulation probabiliste (Figure 2) est applicable aux plantes dont la récolte est unique, comme les plantes annuelles et les arbres abattus pour leur bois de chauffage et de construction, et pour les plantes pluriannuelles, telles que canne à sucre, thé, café, cacao, palmier à huile, hévéas, fruits frais et secs, qui sont exploitées par des récoltes annuelles multiples. Dans ce dernier cas, la période de captage CP couvre les récoltes multiples antérieures qui varient selon l'espèce entre 2 et 80 ans. Rappelons que les cultures ligneuses pérennes sont seules prises en compte dans la plupart des bilans carbone à l'exclusion des plantes annuelles.

La cinétique théorique des captages et stockages par les plantes annuelles modélisée par les équations (5) et (6) permet de construire trois matrices 118x127, que nous nommons $[C(t,n)]$

pour le captage, $[R(t,n)]$ pour la restitution et $[C(t,n) + R(t,n)]$ pour le cycle complet, où t est compris entre les années 1961 et 2079, et n est compris entre les années 1932 et 2059. Les vecteurs ligne t contiennent les stocks constitués par les récoltes successives $Réc_n$ en fonction du temps n , et les vecteurs colonne n contiennent les stocks captés, récoltés puis restitués de l'année n en fonction du temps t (Figure 2).

Le bilan net continental des plantes est égal à $-AW + EW$, où AW est le flux absorbé par les plantes et EW le flux restitué issu des plantes. Numériquement, elle est prise égale à la variation d'une année sur l'autre, notée Δ , de la somme des stocks de la ligne t de la matrice $[C(t,n) + R(t,n)]$, notée $\sum_t$, diminuée de la somme des stocks de la ligne $t-1$ de la même matrice.

La formule (7) permet de calculer les restitutions EW_t .

$$EW_t = \Delta \sum_t \{ [C(t,n) + R(t,n)] - AW \} \quad (7)$$

La quantité AW_t de CO_2 captée l'année t est égale à la somme des récoltes de l'année t , notée $Réc_t$, et des captages intermédiaires des plantes en croissance pendant l'année et préparant les récoltes à venir, notée Cin_t , conformément à la formule (8).

$$AW_t = Réc_t + Cin_t \quad (8)$$

Les captages intermédiaires Cin_t de l'année t sont égaux à la variation d'une année sur l'autre, notée Δ , de la somme des captages de la ligne t de la matrice des captages $[C(t,n)]$ après déduction des récoltes $Réc_t$, notée $\sum_t$, diminuée de la même somme de la ligne $t-1$, soit l'expression (9).

$$Cin_t = \Delta \sum_t \{ [C(t,n)] - Réc_t \} \quad (9)$$

Le stock de carbone prélevé dans l'atmosphère par les plantes au cours de l'année n est la somme du vecteur ligne t de la matrice $[C(t,n) + R(t,n)]$ de l'année n moins 40, pour laquelle la capture n'a pas encore commencé, à l'année n .

Résultats

Les quantités totales de CO_2 captées par les plantes entières sont calculées sur la base des statistiques décennales de la FAO (n.d.) qui décrivent les produits mis en marché de l'agriculture, de l'élevage et de la foresterie. Ces quantités sont converties en produits anhydres, puis multipliées par leur teneur en carbone (40%), puis par le rapport des masses CO_2/C (3,37), puis par le rapport plante entière / partie commerciale.

1. Cultures 2023

Les statistiques de production des 160 produits des cultures mondiales incluent les plantes herbacées et arbustives cultivées pour l'alimentation (céréales, légumes, fruits, ...), les fibres textiles (coton, lin, chanvre, ...) ou le plaisir (tabac, raisin, fleurs, ...). Les poids frais sont décrits dans la rubrique « Productions », puis « Cultures et produits animaux ». Le Tableau 1 montre les durées et les quantités de ces produits commerciaux répartis selon les trois catégories décrites plus haut. En 2023, la teneur en eau TE moyenne pondérée par les poids

secs des produits des cultures était de 45,6%. Nous avons considéré que la durée maximale de restitution RM des céréales et autres produits secs est de 20 ans.

Tableau 1 : Durées pondérées par les poids de carbone de captage CP, de restitution RM, et poids anhydres des 160 produits des cultures mondiales mis en marché en 2023 (source FAO, n.d.).

	CP an	RM an	Poids sec Mts
Produits secs et conserves	9,3	17,7	3.926,3
Semi-conserves	6,9	0,8	421,2
Produits frais	7,8	0,1	1.030,2
Total	4,4	15,6	5.377,8

2. Fourrages 2023

Les fourrages sont des plantes annuelles pour la plupart, dont les coupes sont stockées pendant 0,8 à 3 ans pour attendre la maturité et passer les périodes improductives. Ils sont transformés en viandes, laits, abats, œufs, miels ... par les animaux qui s'en nourrissent et mobilisent leur carbone. La restitution sous forme de CO₂ se fait par respiration du cheptel ainsi que par minéralisation de leurs excréments et des produits non alimentaires (peaux, cire, soie, etc). Elle dure entre 40 jours (œufs) et 100 ans (cire d'abeille). Les 48 produits de l'élevage mondial sont répertoriés sous la forme des quantités de viandes, laits, œufs consommables par l'homme exprimées en tonnes décrites dans les statistiques « Production – Quantité » et « Élevage primaire ». Ces produits sont principalement destinés à compléter l'alimentation humaine par des protéines de qualité et un ensemble de micro-nutriments comme les vitamines A, B-12, riboflavine et sels minéraux. Ils résultent de la conversion par les animaux ruminants et monogastriques de végétaux issus des prairies, feuillages et cultures. Les taux de protéines varient entre 3,2% pour les laits et 32% pour les produits carnés.

D'après Mottet et al., 2017, le cheptel mondial consommait 6 Gt/an de fourrages anhydres en 2010. Après mise à jour sur la base de la démographie, ces fourrages anhydres sont calculés par application d'un taux de conversion moyen (poids sec de fourrage/poids frais de produit d'élevage) de 4,33 toutes espèces confondues. Une partie des cultures décrites à la section précédente est destinée à l'alimentation animale. Il s'agit des céréales (blé, maïs, sorgho, ...) entrant dans la composition des aliments du bétail. Pour éviter de la compter deux fois, une réduction de 14% est appliquée aux fourrages calculés sur la base des produits animaux mis en marché (Tableau 2). C'est la part des fourrages consommable par les humains, d'après les travaux précédemment cités.

Tableau 2 : Durées pondérées par les poids de carbone de captage CP, de restitution RM, et poids anhydres des 48 produits de l'élevage mondial mis en marché en 2023 (source FAO, n.d.).

	CP an	RM an	Poids sec Mts
Produits secs et conserves	0,9	18,5	145,4

Semi-conserves	0,7	0,6	4.200,6
Produits frais	2,0	0,2	2.125,0
Total	1,3	0,8	6.461,5

3. Sylviculture 2023

Les statistiques des quantités de bois produites dans le monde sont disponibles à la section « Forêts » des « Données » de FAO (n.d.). Ces « Production – Quantité » de bois de chauffage, grumes de sciage, bois de trituration et bois industriels exprimées en m³ sont converties en tonnes sèches (Tableau 3). Pour cela, une densité de 0,6 t/m³ est retenue pour les conifères et de 0,7 pour les non-conifères.

Tableau 3 : Durées pondérées par les poids de carbone de captage CP, de restitution RM, et poids anhydres des 8 produits de la sylviculture mondiale mis en marché en 2023 (source FAO, n.d.).

	CP an	RM an	Poids sec Mts
Produits secs et conserves	40,0	53,3	1.240,0
Semi-conserves	40,0	2,0	4.200,6
Produits frais	0,0	0,0	2.125,0
Total	44,0	18,3	2.589,8

4. Autres 2023

A ces produits des plantes cultivées, il faudrait ajouter le captage par les plantes et les animaux sauvages. Le stock de matière organique inexploitées (forêts primaires, nécromasses, hétérotrophes du sol, tourbes, haies, ...) est relativement stable et son flux intervient à la marge dans le cycle polymérisation - minéralisation du carbone. Les couverts végétaux non exploités présentent un bilan photosynthèse-respiration proche de la neutralité dans la durée, ce qui est photosynthétisé de jour étant dégradé la nuit ou à l'ombre de la canopée par les organismes décomposeurs ou par combustion. Nous n'avons pas pris ces stocks de carbone en compte ce qui confère une valeur conservatrice à nos chiffres. De même, nous avons considéré les variations des stocks de carbone des produits aquatiques (pêche et aquaculture) et des populations animales à terre (humanité et cheptel). Elles étaient inférieures d'un facteur 1000 à celles des trois principales productions végétales terrestres, aussi ont-elles été négligées par la suite.

5. Parties non commerciales

Il faut aussi tenir compte des biomasses végétales non commercialisées mais inhérentes aux cultures telles que les feuilles et tiges pour la partie aérienne, et les racines et exsudats pour la partie enterrée. Ces parties restent sur place et enrichissent le sol en carbone organique. Les demi-vies de stockage DSC de ces nécromasses correspondent au temps moyen de résidence du carbone avant la minéralisation par les organismes décomposeurs.

Les poids des parties aériennes ont été calculés sur la base d'un indice de récolte moyen de 0,42 (Hay, 1995). Le système racinaire est estimé à 30 % de la biomasse des plantes des cultures, 65 % des plantes des prairies et 15 % de la biomasse totale des arbres (Blume et al., 2015). En conséquence de quoi, les rapports plante entière / partie commerciale sont égaux à 1,72, 2,07, et 1,57 pour les cultures, fourrages et produits forestiers, respectivement.

6. Les durées de stockage 2023

Les demi-vies de stockage ont été calculées sur ces bases après addition des parties non-commerciales pour l'année 2023 (Tableau 4).

Tableau 4 : Durées pondérées par les poids anhydres de carbone de captage (CP), de restitution (RM), et demi-vie de stockage (DSC) des plantes entières récoltées en 2023, en années. ET=écart-type.

	CP	RM	DSC	SD
Cultures	4,4	25,8	15,1	0,3
Fourrages	1,3	21,1	11,2	0,1
Forêts	44,0	38,9	41,4	3,7
Moyenne	9,4	25,8	17,6	0,7

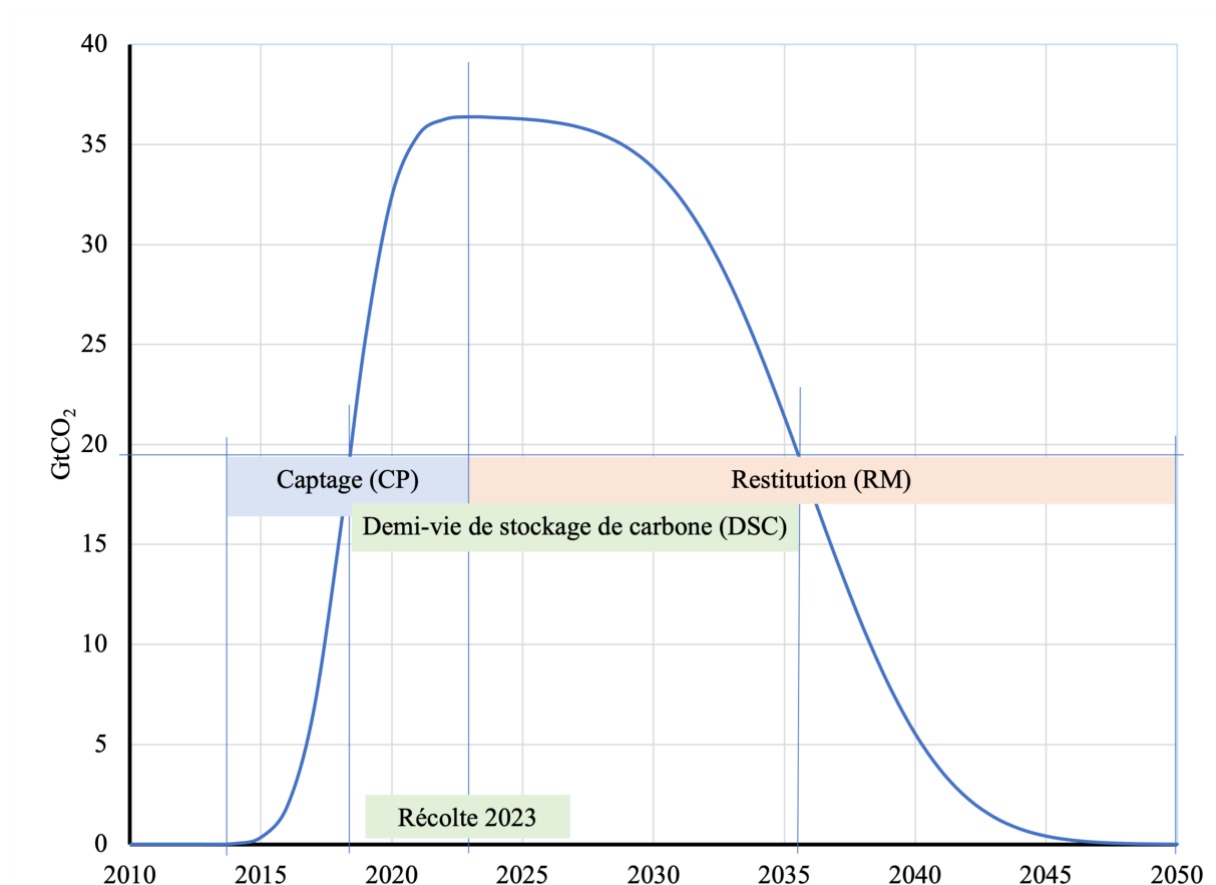
La demi-vie DSC selon la formule (3) des stocks de carbone constitués par toutes les plantes cultivées est de $17,6 \pm 0,7$ ans. La DSC des arbres exploités est la plus longue, avec $41,4 \pm 3,7$ ans. La DSC des plantes fourragères est la plus courte avec $11,2 \pm 0,1$ ans, ce qui est une durée suffisante pour figurer dans les bilans carbone. Les cultures présentent une DSC intermédiaire de $15,1 \pm 0,3$ ans.

À la suite de ces résultats, la cinétique théorique des CSCP en 2023 est simulée à l'aide des équations (5) et (6) avec les paramètres du Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres de la simulation par les formules (5) et (6) de la variation des stocks de carbone en fonction du temps en 2023.

	Unités	Notations	Valeurs
Récolte de l'année 2023	GtCO ₂ /an	Réc	36,4
Cambrure captage	an	σ_c	1,4
Durée moyenne du captage	an	CP	9,4
Cambrure restitution	an	σ_r	4,0
Durée moyenne de la restitution	an	RM	25,8

La Figure 2 montre la cinétique de variation des captages et restitutions de CO₂ atmosphérique consécutive aux récoltes de 2023. Elle décrit les éléments du vecteur-colonne 2023 de la matrice $[C(t,n) + R(t,n)]$. Le stock de CO₂ prélevé par la récolte 2023 s'étend sur environ 40 ans. La cinétique est fortement asymétrique, avec une restitution prenant trois fois plus de temps que la capture. Ce retard à la restitution se traduit par une accumulation des stocks de carbone des campagnes successives dont les productions vont en s'accroissant.



7. Solde net 2023

Au stock de carbone des plantes récoltées s'ajoute celui des récoltes à venir en cours de constitution. Ce captage intermédiaire noté Cin était de -2,7 GtCO₂/an d'après (9), ce qui porte le captage total des plantes entières cultivées mondiales AW à -39,1±0,5 GtCO₂ en 2023 (Tableau 6).

Tableau 6 : Quantités totales de CO₂ captées et stockées par les récoltes de l'année 2023 dans les produits commerciaux et les plantes entières de l'agriculture, de l'élevage et de la sylviculture mondiales et leur écart-type (ET), en GtCO₂/an.

GtCO ₂ /an	Produits commerciaux	ET	Plantes entières	ET
Cultures	7,9	0,2	13,6	0,5
Fourrages	8,2	0,3	16,9	0,5
Forêts	3,8	0,4	6,0	0,5
Captages intermédiaires			2,7	0,8
Total	19,8	0,3	39,1	0,5

La formule (7) donne une restitution EW de $8,2 \pm 1,8$ GtCO₂/an en 2023, soit un solde net des plantes mondiales cultivées de $-31,0 \pm 1,9$ GtCO₂/an prélevés dans l'atmosphère.

8. CSCP mondiaux sur le demi-siècle

A l'exception des récoltes Réc, les autres paramètres σ , CP et RM du Tableau 5 ont été conservés pour simuler la variation des stocks des années 1932 à 2059, hypothèse discutable mais simplificatrice. Elle paraît acceptable étant donné que les proportions relatives des produits agricoles et forestiers n'ont pas beaucoup évolué au cours du demi-siècle, contrairement aux quantités.

Pour décrire les variations des CSCP sur le demi-siècle (Figure 3), il a fallu remonter à 1940 pour inclure tous les stocks en cours de restitution en 1970, et anticiper jusqu'en 2030 pour inclure tous les stocks en cours de captage en 2023. Pour cela, nous avons extrapolé jusqu'en 1940 selon la régression linéaire $AW = 0,4198 * n - 809,39$ et jusqu'en 2030 selon la régression $AW = 0,4883 * n - 945,42$ où n est l'année considérée. C'est une hypothèse acceptable compte tenu de la valeur élevée des coefficients de détermination ($R^2 \geq 0,985$).

Rappelons que ces CSCP sont des puits dont les valeurs sont négatives dans la formule (2) du bilan atmosphérique. Seule une bosse inexpiquée due principalement aux fourrages rompt la linéarité autour de 2010. Le crochet final marque la reprise qui suit la pandémie de COVID 19.

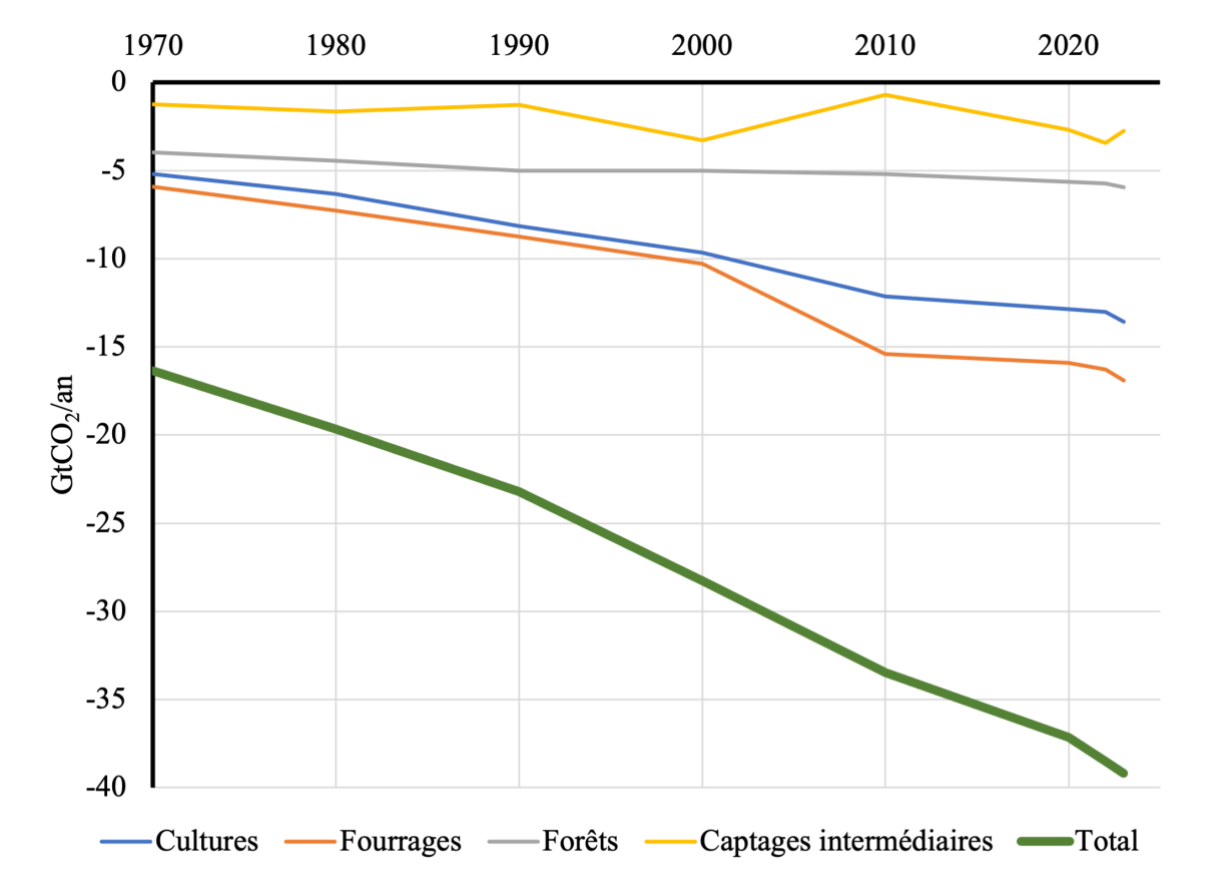


Figure 3 : Captages mondiaux de CO₂ par les plantes entières cultivées de 1970 à 2023 (GtCO₂/an ; d'après FAO, n.d.).

La description de la cinétique des CSCP de 2023 a été étendue au demi-siècle 1970-2023 en supposant que seuls varient les récoltes $R_{\text{éc}}$ et que les autres paramètres du Tableau 5 restent inchangés pour les années qui précèdent et suivent 2023. Cette disposition paraît acceptable dans la mesure où les proportions relatives des produits agricoles et forestiers n'ont pas beaucoup évolué sur le demi-siècle, à la différence des quantités produites.

La Figure 4 décrit les variations des vecteurs colonne de la matrice $[C(t,n) + R(t,n)]$ sur le demi-siècle.

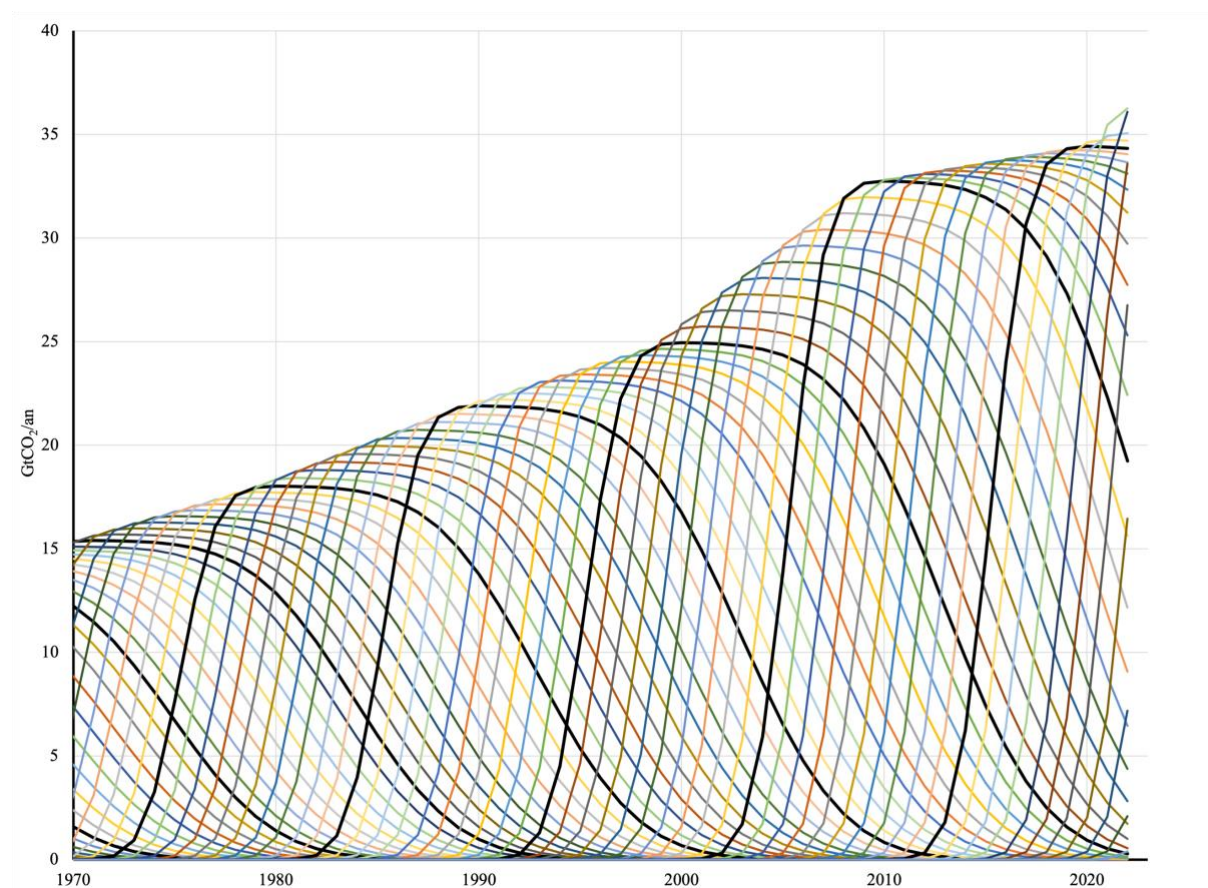


Figure 4 : Cinétiques des captages et stockages de carbone par les plantes (CSCP) mondiaux entre 1970 et 2023 (GtCO₂/an). Les traits noirs épais correspondent aux années décennales.

9. Les stocks cumulés issus des plantes cultivées

Les CSCP des récoltes annuelles successives illustrés par la Figure 4 constituent les stocks de carbone des plantes cultivées présents dans le sol, les édifices, les magasins et sur les étagères. La figure 5 montre l'évolution de ces stocks anthropiques qui ont atteint $123,3 \pm 3,9$ GtC en 2023. Le crochet final pourrait être lié à la pandémie de COVID-19. Comparés au CO₂ atmosphérique et malgré sa forte augmentation, ces stocks ont doublé en un demi-siècle, passant de 7 % à 14 %. Sur le demi-siècle, ils ont été multipliés par 2,5, autant que les émissions fossiles ($\times 2,5$) et plus que la population humaine ($\times 2,2$). Ceci n'inclut pas les stocks

sauvages (forêts primaires, nécromasses, hétérotrophes du sol, tourbes, haies, etc.), dont l'estimation alimente les discussions.

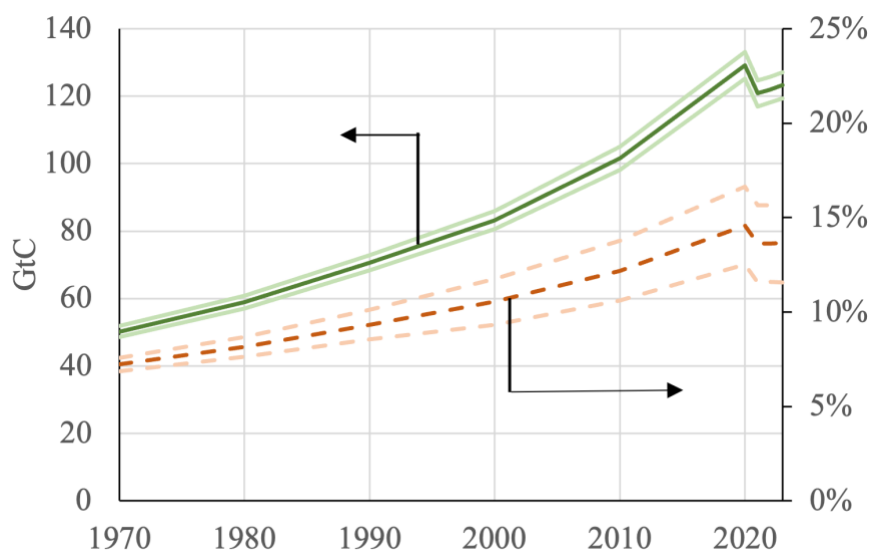


Figure 5 : Stocks mondiaux de carbone (GtC) accumulés par les plantes cultivées au cours du demi-siècle (axe de gauche, lignes continues). Moyenne en vert foncé, plus et moins l'écart type en vert clair. Ratio de ces stocks végétaux sur le stock atmosphérique (axe de droite – lignes pointillées). Moyenne en rouge foncé, plus et moins l'écart type en rouge clair.

Les autres composants du bilan carbone identifiés dans la formule (2) sont précisés ici. Il s'agit des émissions par combustion d'hydrocarbures fossiles EFOS et de la variation du CO₂ atmosphérique VCA.

10. Les émissions fossiles

La Figure 6 montre la distribution des émissions de CO₂ par combustion d'hydrocarbures fossiles pendant le dernier demi-siècle de quelques pays et groupes de pays telles que fournies par l'association anglaise Global Change Data Lab (GCDL). Les émissions mondiales atteignent 37,8 GtCO₂/an en 2023, en augmentation malgré un recul en 2020 pendant la crise sanitaire. Ces émissions incluent « d'autres émissions de gaz à effet de serre, le mix énergétique, ainsi que d'autres indicateurs d'intérêt potentiel », sans qu'aucune capture ne les réduise. Les principaux pays émetteurs sont la Chine (11,9 GtCO₂/an), les États-Unis (4,9 GtCO₂/an), l'Inde (3,1 GtCO₂/an), l'Union Européenne à 27 (2,5 GtCO₂/an) dont la France (272,53 MtCO₂/an). Alors que la part des pays les plus industrialisés, qui s'appuient de plus en plus sur des sources d'énergie à faible émission de carbone, diminue depuis 2010, celle d'autres pays, dont la Chine et l'Inde, qui s'équipent activement de centrales à combustion, augmente depuis 2000.

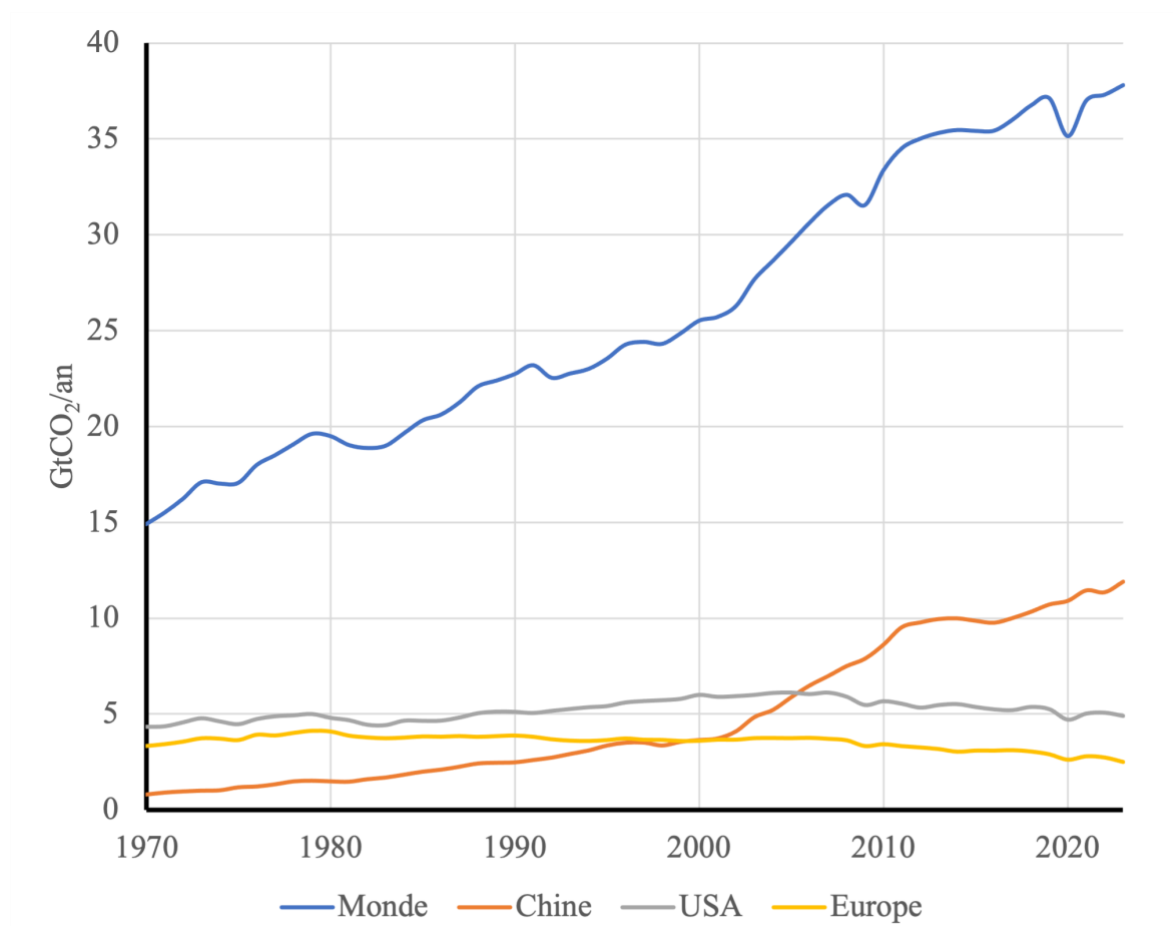


Figure 6 : Variations sur un demi-siècle des émissions de gaz carbonique par combustion d'hydrocarbures fossiles, en GtCO₂/an (Source : Global Change Data Lab, n.d.).

11. L'atmosphère

La variation de la teneur atmosphérique en CO₂ (TAC) mesurée par Keeling (2001) à l'Observatoire du Mont Mauna Loa (MLO) sur la grande île de l'archipel de Hawaï à partir de 1958 montre une tendance haussière nette de plus de 2 ppm/an et présente des oscillations annuelles avec augmentation moyenne de 6 ppm de août à avril (saison froide boréale) et diminution moyenne de 4 ppm d'avril à août (saison chaude boréale). Bien que situé loin des côtes et en altitude, ces enregistrements indiquent une forte influence des continents de l'hémisphère Nord qui émettent les plus grandes quantités de CO₂ et le captent activement par photosynthèse. La Figure 7a décrit la cinétique du stock de CO₂ atmosphérique. L'augmentation lissée de la masse de CO₂ atmosphérique, noté VCA, est linéaire comme indiqué par la Figure 7b.

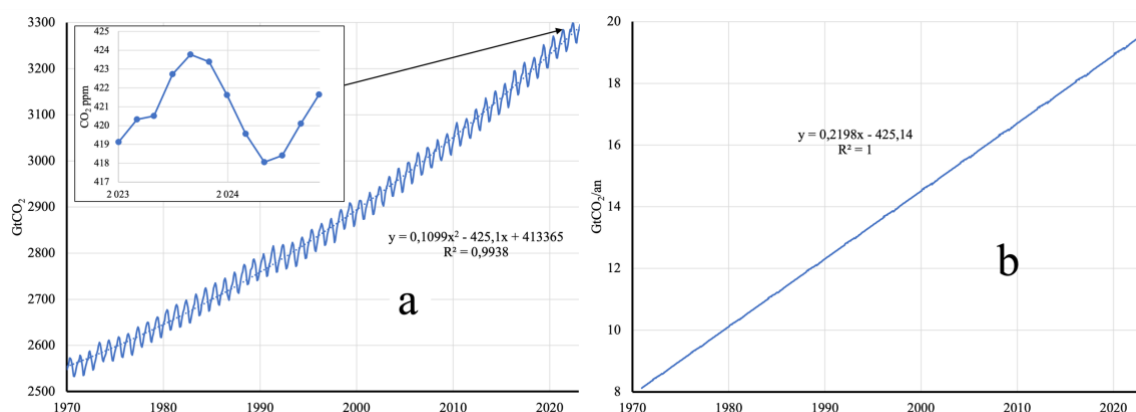


Figure 7 : Évolution de la masse du CO₂ atmosphérique en GtCO₂ sur le demi-siècle avec détail de l'année 2023 (ppm) à gauche (a) et de son accroissement annuel (VCA) lissé à droite (b) en GtCO₂/an, d'après les observations du MLO.

Pour déterminer la variation de la masse de CO₂ atmosphérique VCA, nous avons multiplié les TAC en ppm mesurées par le MLO par 7,84 GtCO₂/ppm, puis lissé ces valeurs par un polynôme d'ordre 2 (Figure 7a) et pris la dérivée (Figure 7b), soit la régression linéaire $VCA = 0,2198 \cdot n - 425,14$ ($R^2 = 0,99$), où n est la date en années, ce qui donne $19,5 \pm 0,7$ GtCO₂/an en 2023.

12. Le bilan carbone

Le bilan mondial selon la formule (2) des échanges de CO₂ en 2023 (Tableau 7) montre que les plantes exploitées par l'homme sont le principal puits de CO₂ de la planète. La demi-vie DSC moyenne pondérée de ce puits est de 17,6 ans et dépasse 40 ans pour les produits forestiers. Selon notre modélisation, le captage par les plantes cultivées AW pourrait compenser une part très importante – voire majoritaire – des émissions fossiles EFOS, ce qui appelle à une réévaluation des rôles respectifs des puits de carbone. Le solde net – AW + EW était un puits anthropique qui compensait 82% des émissions fossiles EFOS en 2023.

Tableau 7 : Éléments du bilan des échanges de CO₂ et leur écart-type (ET) en 2023 (GtCO₂/an). Les sources sont positives et les puits négatifs.

Composant du bilan	Notation	Valeur	ET
Variation atmosphérique	VCA	-19,5	0,7
Captage par les plantes cultivées	AW	-39,2	0,5
Restitutions issues des plantes	EW	8,2	1,8
Émissions par combustions fossiles	EFOS	37,8	1,0
Contribution de l'océan mondial	Co	12,7	3,0
Somme algébrique		0,0	

Les composants du bilan mondial selon la formule (2) varient comme illustré par la Figure 8 pendant le dernier demi-siècle. Ces composants sont croissants en valeur absolue.

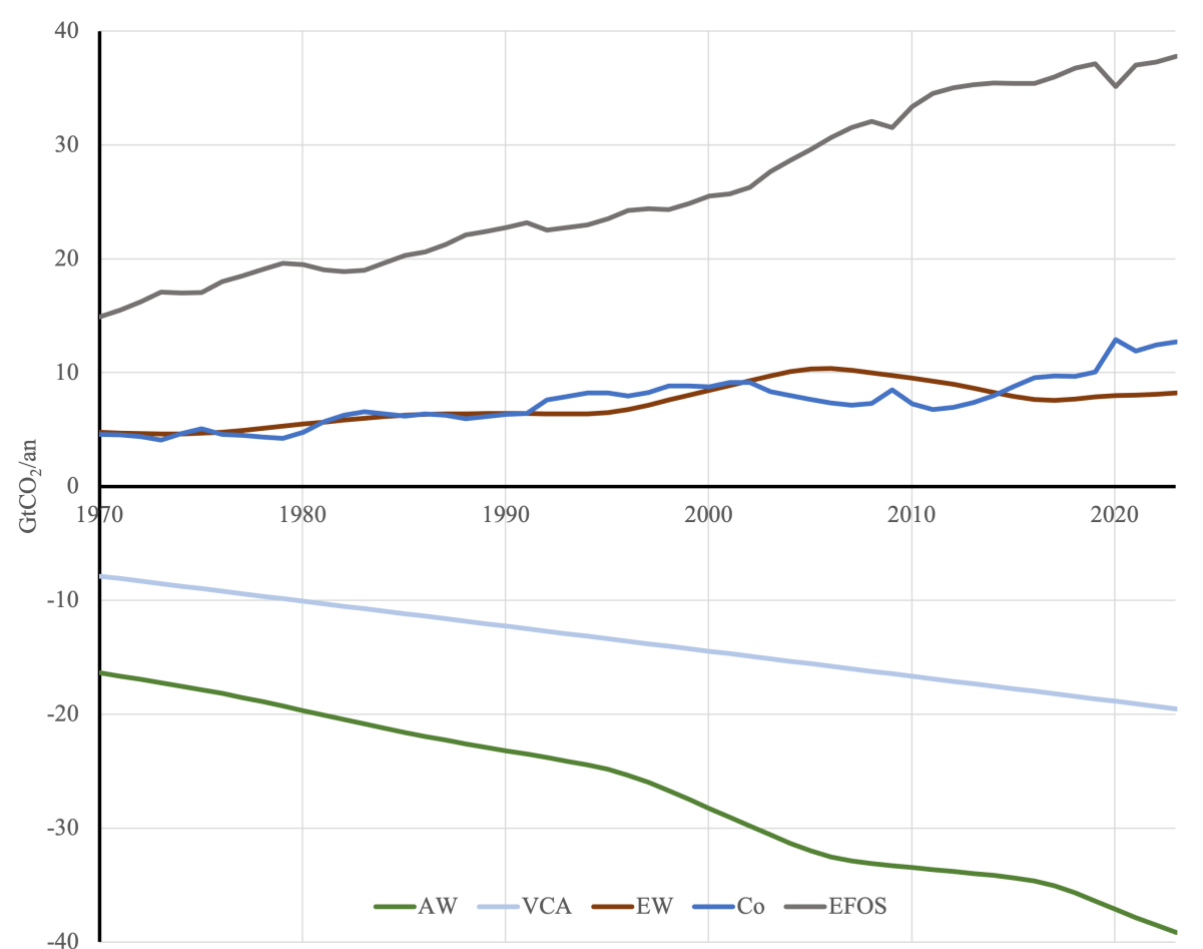


Figure 8 : Variations sur le demi-siècle des 5 composants du bilan d'échange de CO₂ (AW absorption par les plantes ; VCA variation atmosphérique ; EW restitutions issues des plantes ; Co contribution de l'océan ; EFOS émissions fossiles). Les sources sont positives et les puits négatifs. Leur somme algébrique est nulle.

Discussion

Les captages des plantes entières cultivées (AW) et les émissions par combustion d'hydrocarbures fossiles (EFOS) suivaient l'évolution de la population humaine qui est passée de 3,7 en 1970 à 8,1 milliards d'individus en 2023. Les trois grandeurs ont plus que doublé sur la période en conservant les mêmes proportions.

La présente analyse met en évidence des différences sensibles avec les résultats présentés dans la littérature. Pour la seule année 2023, la Figure 9 compare les composants du bilan atmosphérique de CO₂ résultant de nos calculs à ceux proposés par Friedlingstein et al. (2023).

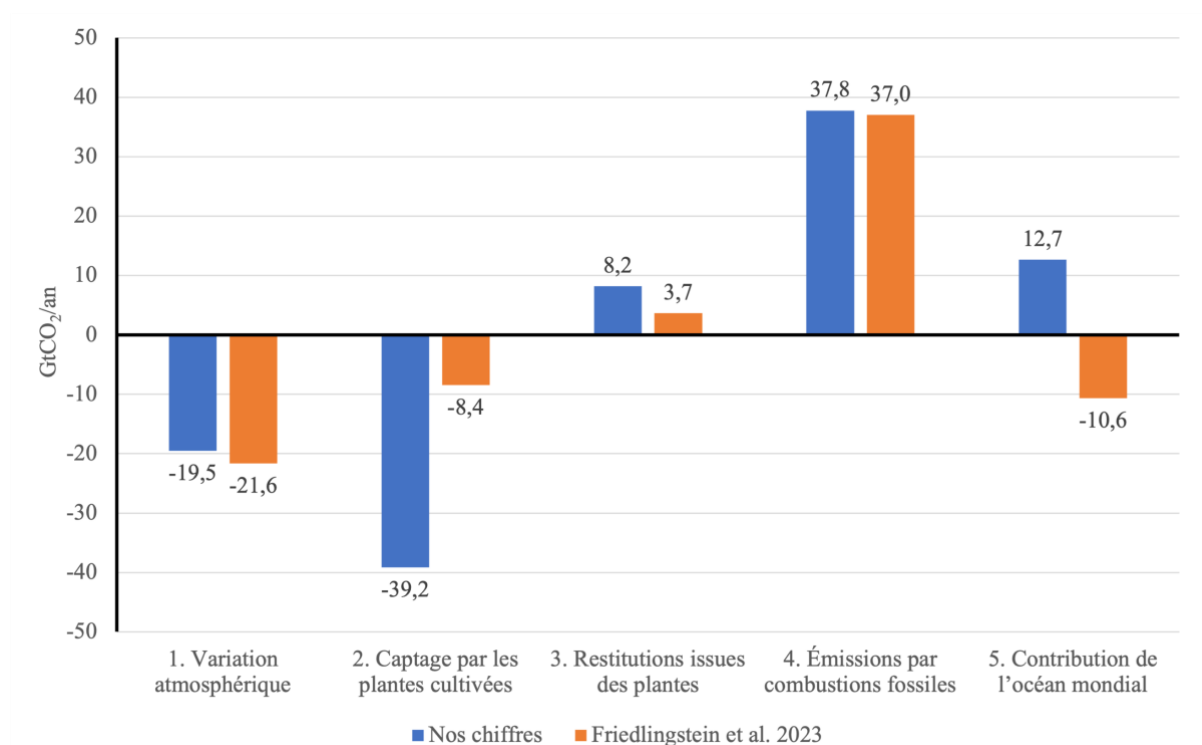


Figure 9 : Puits (négatifs) et sources (positives) de CO₂ calculés ici et comparés à ceux des auteurs cités excluant les cultures annuelles, en milliards de tonnes de CO₂ par an pour le monde en 2023. La somme algébrique est nulle dans les deux cas.

Les composants 1 (VTA) et 4 (EFOS) de la Figure 9, obtenus auprès des statistiques publiques, sont voisins. En revanche, de fortes différences concernent les composants 2 (AW), 3 (EW) et 5 (Co). Notre estimation du captage AW, qui inclut les cultures annuelles, est nettement supérieure (x5) à celles qui les excluent. Elle était trois fois supérieure à celle de Pan et al. (2024) évalué à 12,8 GtCO₂/an pendant la décennie 2010. Notre capture par les plantes cultivées (AW) compense à elle seule presque entièrement les émissions anthropiques totales estimées à 41,46 GtCO₂ par Ritchie & Roser (2024) en 2022, dont 37,15 GtCO₂ provenant de la combustion énergétique et industrielle d'hydrocarbures fossiles (Global Carbon Budget). Jia et al. (2025) ont estimé le puits de carbone organique constitué par les sols globaux à $6,7 \pm 3,3$ GtCO₂/an entre 1992 et 2020, ce qui est du même ordre que celui de Friedlingstein et al. (2023). En comparaison, notre restitution par les plantes est deux fois supérieure à celle des auteurs cités. Enfin, rappelons ici que notre bilan végétal net – AW + EW était un puits anthropique de $-31,0 \pm 1,9$ GtCO₂/an, plus de 6 fois celui de Friedlingstein et al. (2023), qui compensait 82 % des émissions fossiles EFOS en 2023.

Notre contribution de l'océan mondial 5 est une source alors qu'elle est un puits pour les auteurs cités. Ces différences résultent directement de l'absence de prise en compte des plantes annuelles qui est presque générale dans la littérature, en dehors de toute autre considération. Elles sont de nature à modifier le regard porté sur certains aspects des politiques climatiques retenues à ce jour.

1. Autres approches

Devant l'importance des différences entre nos valeurs et celles de la littérature, nous avons vérifié leur pertinence par plusieurs approches. Nous n'avons trouvé dans la littérature

qu'une seule publication décrivant la part des plantes annuelles dans le captage de carbone mondial (Wolf et al., 2015). Sur la base des mêmes sources que nous (FAO n.d.), il est fait mention d'une contribution des plantes annuelles récoltées et des fourrages de 28,2 GtCO₂/an en 2011, à comparer à notre 27,6 GtCO₂/an en 2010, ce qui est cohérent. Les ordres de grandeur sont trois fois supérieurs à ceux des auteurs ne prenant pas en compte les plantes annuelles (e.g. Le Quéré, 2012). Toutefois, Wolf et al. (2015) considéraient que la durée de stockage ne dépassait pas l'année, la restitution par respiration suivant immédiatement la récolte, ce qui est conforme à la disposition écartant les plantes annuelles. Celle-ci ne correspond pas à la réalité sauf dans le cas très rare où la récolte est brûlée. Même dans cette situation extrême, les parties souterraines, qui représentent 30% de la biomasse, perdurent plusieurs décennies. Nous considérons pour notre part qu'une demi-vie de stockage (DSC) de plus de 10 ans ne justifie pas cette exclusion et que les plantes annuelles ont toute leur place dans les bilans carbone.

Connaissant les absorptions par les plantes cultivées AW et leur DSC, on pourrait s'attendre à ce que les restitutions issues des plantes EW soient proches du rapport AW / DSC, soit 2,2 GtCO₂/an en 2023. Ce chiffre est sensiblement inférieur à notre valeur EW, sans doute en raison de l'asymétrie de la cinétique autour de la récolte.

Nous avons également approché l'ordre de grandeur de la restitution par les plantes cultivées EW en considérant la consommation mondiale de dioxygène. D'après Huang et al. (2018), elle serait d'environ 48 GtO₂/an en 2023. La principale contribution était due à la combustion des hydrocarbures fossiles qui consommait 38,2 GtO₂/an en 2015, soit 41,9 GtO₂/an en 2023 en modulant par la population mondiale. La différence avec la consommation mondiale totale de dioxygène, soit 6,1 GtO₂/an, est due à la minéralisation de la matière organique par respiration, fermentation et combustion. D'après la formule (1) prise dans le sens de la respiration de droite à gauche, la production de CO₂ résultant de cette consommation de dioxygène serait de 8,4 GtCO₂/an, ce qui est dans la fourchette de notre évaluation de EW.

2. Différences méthodologiques

Notre captage par les plantes est supérieur d'un facteur 3 à 5 à ceux de la littérature et nous essayons de comprendre la raison d'une telle différence. La première raison est l'absence de prise en compte des plantes annuelles au prétexte que leur restitution se ferait dans l'année qui suit la récolte, ce qui annulerait le captage. Nous avons montré qu'il n'en est rien, la DSC moyenne pondérée par les poids de carbone étant de 8,9 ans. Celle des plantes fourragères, qui sont annuelles pour la plupart, est de 11,2 ans. Ces durées sont bien plus longues que l'année, ce qui efface les raisons d'exclure des plantes annuelles et déséquilibre fortement l'équation (2).

Restent les différences de méthode de mesure des quantités telles que la biomasse des arbres et les nécromasses. Notre approche s'appuie sur la composition chimique des produits commerciaux répertoriés dans les statistiques de la FAO. Les stocks de carbone de la plupart des auteurs sont construits à partir des relevés de terrain et satellitaires par unité de surface et de temps, ensuite étendus par des modèles dynamiques aux surfaces mondiales des différents couverts végétaux ainsi caractérisés. Il semble que cette méthode se heurte à des problèmes de représentativité des mesures caractérisant chaque couvert végétal plutôt qu'aux surfaces de ces couverts qui sont définies précisément grâce à l'imagerie satellitaire. Les estimations des absorptions et émissions continentales et océaniques manquent de précision ce qui

encourage les controverses (e.g. Luyssaert et al., 2008 ; Gundersen et al., 2021 ; Luyssaert et al., 2021 ; Zhong et al., 2024). Dans notre cas, l'échantillonnage est étendu à tous les produits commerciaux des plantes, auquel il faudrait ajouter la part des plantes non exploitées, si elle est significative.

3. L'océan

D'après nos calculs, l'océan serait une source de CO₂ allant en se renforçant (Figure 8). Il dégazerait 12,7±3,0 GtCO₂ en 2023 et fournirait l'augmentation atmosphérique avec les émissions fossiles et les restitutions issues des plantes. Le rôle de puits de 10,3±0,4 GtCO₂/an prêté à l'océan (e.g. Fay et al., 2023) par les auteurs qui ont exclus les plantes annuelles serait ainsi remis en question en signe comme en amplitude. En choisissant la notation Socan « ocean sink », ces auteurs s'interdisent de concevoir l'océan autrement que comme un puits (e.g. Rödenbeck et al., 2015). Cette conclusion a semblé corroborée par les nombreuses mesures en mer de la fugacité du CO₂ et du carbone inorganique total qui tendent à montrer que l'océan absorbe un quart des émissions anthropiques (NOAA - SOCAT). Ainsi, les mesures en mer pourraient être insuffisantes pour décrire les échanges de masse en raison des trous dans l'espace et le temps, de même que les limitations liées à la précision des capteurs et des modèles d'interpolation, ce qui nourrit les controverses (e.g. McGillis et al., 2004).

D'après les carottes glaciaires, les pics de CO₂ suivent les pics de température 600 à 1 000 ans plus tard (e.g. Petit et al., 1999 ; Fischer et al., 1999 ; Caillon et al., 2003 ; Richet, 2021). Ce serait le temps que prendrait l'océan mondial pour trouver un nouvel équilibre thermique avec l'atmosphère par mélange dans les trois dimensions. La réponse tardive de l'océan aux perturbations climatiques incite à chercher le réchauffement à l'origine du présent dégazage bien avant l'augmentation récente des températures mondiales. Le réchauffement climatique appelé « optimum climatique médiéval », qui s'est déroulé du X^{ème} au XIII^{ème} siècle, pourrait être à l'origine de ce dégazage qui fut brièvement interrompu ou ralenti par le « minimum de Dalton », ou « petit âge glaciaire » (1790-1830).

La production primaire océanique (PPO) assurée par les algues est à la base de la chaîne alimentaire aquatique exploitée par la pêche maritime qui a débarqué 81 millions de tonnes de produits en 2022, stable depuis 1980. L'aquaculture, en hausse de plus de 10% par an, produisait 185,4 millions de tonnes d'animaux et 37,8 millions de tonnes de macroalgues en 2022 (FAO, 2024). La PPO a fait l'objet de nombreuses études, utilisant principalement des satellites mesurant la chlorophylle. Depuis 1970, la plupart des auteurs s'accordent pour considérer la PPO comme stable et égale à 51 GtC/an (e.g. Carr et al., 2006 ; Johnson K. S. & Bif M. B., 2021), seuls les événements modifiant les remontées d'eau profonde (e.g. El Niño) perturbant le rythme annuel. C'est 4,8 fois notre estimation du captage par les plantes cultivées AW alors que la surface de l'océan est 2,4 fois plus grande que celle des continents. Rapporté à la surface, le captage des océans surperforme celui des continents d'un facteur 2. Ceci montre à quel point la vie aquatique joue un rôle prépondérant dans l'écosystème terrestre global pour consommer le carbone et produire l'oxygène et la matière organique indispensables à la vie animale.

Au cours des glaciations, la glace s'est accumulée aux hautes et moyennes latitudes des continents. Plusieurs milliers de mètres d'épaisseur ont ainsi façonné leur relief, alors que le niveau de la mer était plus de 100 m en dessous de l'actuel. L'augmentation de la TAC qui suit les glaciations est une conséquence du dégazage du CO₂ de l'océan, qui est un processus

lent impliquant les profondeurs océaniques. Ces cycles diffèrent des cycles saisonniers de la TAC dont les oscillations sont en opposition avec celles de la température. D'après les carottes de glace, l'atmosphère perdrait 100 ppm, soit 212 GtC, tandis que la température chuterait de quelque 8 °C en moyenne pendant les glaciations (Kobashi et al., 2013). Cette masse carbonée passerait dans l'océan qui la restituerait lors du réchauffement postglaciaire. Ces échanges représentent une infime fraction (0,5 %) des stocks de carbone océanique estimés à 40 TtC (Bopp et al., 2019). Depuis le milieu du XIX^e siècle, l'atmosphère s'est enrichie de 300 GtC, qui ont été largement compensés la perte glaciaire, grâce aux deux sources principales que sont les émissions fossiles et l'océan.

4. Les rendements surfaciques de captage

Les chiffres mondiaux des captages issus de notre calcul (Tableau 6) sont minorants car ne comprenant pas la part des populations animales et des couverts végétaux sauvages. Ces couverts sont les forêts (tropicales, tempérées, boréales), toundras, broussailles méditerranéennes, savanes et prairies tropicales, prairies tempérées et déserts. D'après Saugier et al. (2001), le captage surfacique serait compris entre 3,7 (déserts) et 43,1 (forêt tropicale) tCO₂/ha/an. La part des cultures n'était créditée que de 10,1 tCO₂/ha/an par ces auteurs. La part des forêts était fortement surévaluée et celle des cultures significativement sous-estimée. En effet, nous évaluons le rendement surfacique moyen pondéré par le poids sec des plantes entières à 19,4±0,7 tCO₂/ha/an au niveau mondial en 2023. Les cultures sucrières (cannes et betteraves) et d'huile de palme arrivent en tête avec deux à trois fois la moyenne, suivies des cultures de légumes (oignons, carottes, navets, haricots, aubergines ...) dont les rendements sont supérieurs à la moyenne.

La végétation continentale non exploitée est stable et intervient à la marge dans le captage du carbone atmosphérique. Si les vieilles forêts non exploitées captent encore, elles le font à des niveaux très inférieurs à la plupart des cultures et élevages. À titre d'exemple, la réglementation actuelle sur l'exploitation forestière au Brésil adopte un taux de récupération post-récolte standard correspondant à un rendement surfacique de captage de 0,9 tCO₂/ha/an (Vidal et al., 2020), soit 20 fois moins que les plantes entières cultivées. Le captage moyen de la forêt française est de 3,3 tCO₂/ha/an (IGN, 2013), soit 6 fois moins que les cultures.

Les coupes et incendies forestiers n'entraînent pas de perte de capacité à capter et stocker le CO₂. Le stock du sol reste en place tandis que la repousse spontanée ou replantée continue à capter avant de nouvelles coupes 25 à 35 ans plus tard. Si la forêt est remplacée par des pâturages ou des cultures, l'espace qu'elle libère capte du CO₂ à des niveaux plus de 10 fois supérieurs.

5. Captage et stockage de carbone (CSC)

Pour atteindre la neutralité carbone, la plupart des gouvernements développent une capacité de CSC principalement par enfouissement dans les couches géologiques profonde. Au 31 juillet 2023, la capacité totale des projets mondiaux de CSC par enfouissement en cours de développement, de construction et d'exploitation était de 361 MtCO₂/an, soit 1% des émissions fossiles. Cette modeste capacité est en augmentation de près de 50% par rapport à 2022, d'après le rapport sur l'état mondial du CSC (Global CCS Institute, 2023). La neutralité carbone paraissant hors d'atteinte à brève échéance, une étape à 55% de réduction des émissions est prévue en 2030.

D'après Global CCS Institute (2023), lorsque tous les projets de CSC par enfouissement mondiaux seront opérationnels, leur capacité sera de 100 MtCO₂/an, soit 440 fois moins que les plantes exploitées par l'homme qui constituent de loin le premier dispositif de CSC de la planète. Toutes les émissions de l'Union Européenne (2,51 GtCO₂/an) étaient compensées par les seules céréales qu'elle produisait en 2023 (-3,5 GtCO₂/an). L'UE regarde comme une priorité de trouver des récompenses financières adéquates pour promouvoir l'élimination du carbone dans les différents secteurs de l'agriculture, de la foresterie et de l'industrie mais n'a toujours pas reconnu les CSCP. Plusieurs pays ont conscience du rôle important des cultures végétales mais posent cependant la question de la certification, sur une base scientifique admise par toute l'UE, des CSCP.

La France est fortement décarbonée, l'essentiel de son électricité étant d'origine nucléaire. Sans aucune incitation ni modification des pratiques, l'agriculture française a capté 174 MtCO₂/an pour 17,6 ans 64% des émissions nationales totales en 2023, soit plus de 6 fois l'objectif CSC pour 2030, et deux fois les émissions industrielles éligibles au CSC.

Le secteur de l'agriculture fait l'objet de critiques pour ses émissions de CO₂, méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O). D'après Maréchal (2022) par exemple, le secteur serait responsable de 23 % des émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre, soit 12 Gt d'équivalent CO₂/an. Ces auteurs ne considèrent pas la photosynthèse continentale dont le solde net captage – restitution est largement favorable au monde rural.

L'absence de prise en compte de l'agriculture et de la foresterie dans la compensation des émissions de CO₂ serait une injustice persistante s'il n'y avait quelque signes de reconnaissance en cours qui marquent une évolution sensible vers une réparation de cet oubli lésant le monde rural. Ainsi, depuis 2020, le gouvernement français identifie un marché dit de la compensation carbone volontaire qui prévoit que « *...les agriculteurs peuvent mettre les crédits carbone qu'ils ont dégagés ... sur le marché de la compensation volontaire de carbone* ». Sur la base moyenne de 100 € par tCO₂, la rémunération des CSCP dégagerait 23 milliards d'euros de revenu additionnel qui viendraient s'ajouter aux 57 milliards d'euros de produits vendus en 2021, soit un accroissement du revenu paysan français de l'ordre de 40%.

Le Kenya est largement excédentaire et compense plus de 3 fois ses émissions fossiles par la culture des plantes. Comme la plupart des pays cherchant à sortir de la pauvreté, il pourrait vendre son excédent aux émetteurs dans le cadre du marché mondial du carbone. Par exemple, dans le cas du Kenya et d'un crédit carbone à 100 €/tCO₂, cela pourrait rapporter 9 milliards d'Euros par an à la paysannerie locale.

La prise en compte des CSCP a vocation à s'étendre à toutes les productions végétales mises sur le marché. Leur rétribution représenterait une source de revenu conséquente pour la paysannerie qui aurait désormais pour mission, outre la fourniture de denrées essentielles pour l'humanité, d'éviter ou compenser les émissions de CO₂ pour limiter un changement climatique dont ce gaz serait responsable.

Notons ici qu'il existe d'autres ressources végétales, cultivées ou non, qui pourraient constituer des CSCP. C'est ainsi que les macroalgues cultivées captaient 8,0 MtCO₂/an dans le monde en 2023. Les sargasses qui envahissent naturellement l'Atlantique équatorial pourraient être récoltées en mer puis transformées en biocarburant et en fertilisant, ce qui

réduirait le recours aux énergies fossiles et, simultanément, les échouages calamiteux sur les côtes orientales de l'Amérique centrale et des îles caraïbéennes. Selon Marx et al. (2021), le traitement de ces sargasses pourrait produire 8500 barils de pétrole brut par jour pour un CSCP de 1,9 MtCO₂/an.

6. La raréfaction du gaz carbonique

Principalement en raison de la croissance de la population humaine, la surface agricole par habitant (ha/c) a été réduite de moitié pendant le dernier demi-siècle, passant de 1,2 à 0,6 ha/c. Malgré cela, la production par habitant a augmenté de 0,51 à 0,60 t/c/an, ce qui a évité les tensions alimentaires. La production des plantes traverse une période faste comme le montrent les mesures de la surface foliaire et le verdissement de la terre (NASA, 2016). L'augmentation de la TAC passée de 325 à 420 ppm est la principale cause de l'amélioration des rendements globaux de la production agricole par unité de surface (Haverd et al., 2020), qui ont plus que doublé, passant de 0,5 à 1,3 t/ha/an, d'après les statistiques 2019 de la FAO (n.d.). Cela pourrait également expliquer pourquoi le stock net cumulé de carbone biofixé par les plantes cultivées a plus que doublé, passant de 184 à 452 GtCO₂ retirés de l'atmosphère.

Le gaz carbonique se dissout dans l'eau de mer en se combinant pour former des ions bicarbonate et carbonate partiellement insolubles. Le carbone est réparti dans les profondeurs des océans sous forme dissoute par les courants de densité et sous forme particulaire par la gravité et les courants. Les carbonates insolubles s'accumulent au fond en même temps que la matière organique pour constituer le principal stock de carbone de la planète sous la forme minérale des roches calcaires (1,4 10⁵ TtC d'après Sorokhtin et al., 2007) et organique des hydrocarbures fossiles (pétrole, charbon, bitume et gaz – environ 150 TtC). Le principal réservoir de charbon a été constitué avec le développement des forêts au début du Carbonifère (-359 à -299 Ma) alors que la TAC était trois à quatre fois supérieure à celle des temps présents.

Les échanges air-eau de CO₂ sont un puissant processus régulateur de la TAC, y compris pour la photosynthèse puisque ce gaz est admis dans la cellule végétale sous forme dissoute avant d'y être polymérisé. Sachant que l'océan contient environ 50 fois plus de carbone que l'atmosphère, la TAC sera fortement affectée par les variations de température lorsque celles-ci ont le temps de s'exprimer. Les océans auront tendance à absorber le CO₂ atmosphérique dans les régions et en périodes froides et à le rejeter à l'atmosphère par dégazage dans les régions et en périodes chaudes.

L'atmosphère primitive de la Terre était majoritairement composée de CO₂. La TAC a été divisée par 2 000 depuis l'origine de la Terre il y a 4,5 milliards d'années (Gan), et cette diminution se poursuit de façon inexorable au rythme d'environ 1 ppm chaque 80.000 années. Elle atteignait encore 7.000 ppm au Cambrien (-540 millions d'années - Man), puis 1.800 ppm au Jurassique (-200 Man). Aucun réchauffement catastrophique n'est venu interrompre le développement de la vie apparue il y a 3 milliards d'années. Le fait que les glaciations aient parfois coïncidé avec des niveaux de TAC élevés (Carbonifère-Permien) est un autre indice de l'absence de pilotage de la température par le CO₂.

Cette lente diminution de la TAC par lithification se traduira par un arrêt de la vie sur terre, si rien ne vient l'interrompre auparavant. En effet, la photosynthèse des plantes à photosystème en C3 (blé, riz, orge, haricot, manioc, soja, ...) s'interrompt en dessous de 100 ppm et le

rendement des autres plantes (maïs, sorgho, canne à sucre, ...) diminue fortement. La panne de CO₂ a déjà été approchée lorsque la TAC est descendue à 150 ppm au Carbonifère-Permien (-290 Man) puis au Pléistocène (-2,6 Man à -11.700 années). La présente remontée de la TAC est un répit dans cette lente diminution par lithification. Si son origine anthropique est prouvée, elle résulterait du recyclage du carbone piégé dans la croûte terrestre, une sorte de lithification à l'envers un million de fois plus rapide. La diminution de la TAC pourrait être également en partie compensée par le dégazage de la croûte terrestre et l'activité volcanique (Burton et al., 2013). Dans tous les cas, afin de prolonger la disponibilité de ce gaz précieux, il convient de préférer les CSCP aux CSC par enfouissement qui contribuent à sa lithification.

Conclusion

La contribution des plantes cultivées à la biofixation du CO₂ atmosphérique est approchée avec une marge d'incertitude portant à la fois sur les durées de rétention et sur les quantités stockées. Il s'agit d'un exercice délicat en raison de la diversité des éléments à rassembler, teneur en eau, durées de stockage, quantités, que nous avons retenus parmi les plus pertinents de la littérature. Lorsque des doutes apparaissaient, les hypothèses minimisant les deux grandeurs étaient retenues ce qui leur confère un caractère minorant et conservateur. Sous réserve de la précision et de l'exhaustivité de ces éléments et de la qualité des statistiques sur lesquels ils se basent, les CSCP par les produits mis sur le marché en 2023 présentaient une demi-vie de plus de 10 ans, ce qui en fait un composant à prendre en compte dans les bilans carbone. Il en est de même a fortiori lorsque l'on inclut les parties non-commerciales des plantes entières qui restent sur place et enrichissent les sols en carbone et qui présentaient une demi-vie de 17,6 ans. Elles captent deux fois plus de gaz carbonique et le retiennent presque deux fois plus longtemps que les produits commerciaux qu'elles ont portés.

La cinétique des captages et restitutions de carbone sur le demi-siècle a été simulée par une approche probabiliste qui a notamment permis le calcul matriciel des captages intermédiaires et des restitution par minéralisation des biomasses. Les quantités totales de carbone captées et stockées lors de ces productions rurales étaient 5 fois plus importantes que celles de la littérature. La contribution des cultures annuelles aux CSCP s'est révélé être de 77% et leur demi-vie de 8,9 ans. Parmi elles, les céréales captaient à elles seules 60% des cultures annuelles et 21% de toutes les plantes pendant une demi-vie de 10,4 ans. Le reste était dû aux cultures pérennes (arbres fruitiers, palmiers à huile, etc), seules prises en compte par les auteurs cités dans leurs bilans carbone.

Ces chiffres nécessitent d'être affinés et complétés par leur évolution dans le temps et dans l'espace, mais décrivent des grandes tendances. Ils révèlent le caractère exceptionnel des contributions de l'agriculture et de la sylviculture qui ne sont pas encore prises en compte à leurs juste valeur. Ces activités mobilisent le CO₂ atmosphérique à des niveaux qui en font de loin le principal système de CSC entre les mains de l'Homme, sans que celui-ci n'ait eu à modifier ses pratiques pour arriver à ce résultat. De surcroît, elles permettent le retour à l'atmosphère de ce gaz crucial pour l'écosystème planétaire, à la différence des CSC géologiques qui contribuent à sa lithification.

Selon notre simulation, les émissions fossiles anthropiques ne seraient pas responsables de l'augmentation du carbone atmosphérique puisqu'elles seraient presque entièrement bioremédiées par le captage des plantes cultivées. Ceci remet en question leur influence sur le

changement climatique et les politiques visant à les réduire. Outre les émissions fossiles et celles par restitution des plantes, l'autre source responsable de l'enrichissement de l'atmosphère serait l'océan. En effet, contrairement à la plupart des estimations, nos résultats suggèrent que les océans pourraient ne pas jouer le rôle communément attribué de puits de carbone, mais constituer une source fournissant plus de la moitié de cette augmentation.

Avec leur captage considérable et de telles durées de stockage, le manque d'attention dont font l'objet l'agriculture et la sylviculture de la part des organisations internationales et des gouvernements n'est pas explicable. Ces activités ancestrales qui nourrissent, réchauffent, égayent et vêtent l'Homme sont fondées sur la photosynthèse à laquelle nous devons la vie, et qui reste le moyen de captage et de stockage du CO₂ atmosphérique le plus simple et le plus efficace. Elles devraient être récompensées par des crédits carbone dans le cadre du développement des CSC. Cela complèterait leurs revenus pour continuer à exercer, développer et transmettre leur activité.

L'assertion selon laquelle le carbone capté par les plantes annuelles serait annulé par sa restitution dans l'année qui suit la récolte privilégie les stocks durables en place et ne considère pas la variation de ces stocks y compris dans le sol, en magasin ou sur étagère. En réduisant la contribution des flux de carbone d'origine rurale, l'exclusion des cultures annuelles dans les bilans carbone peut conduire à des politiques énergétiques et climatiques déconnectées des réalités agronomiques, et se heurte à l'incompréhension du monde agricole et des pays en développement.

Remerciements

Nous sommes particulièrement reconnaissants à tous les collecteurs de données de la FAO, du GCL, de la NASA, de BP, etc, sans qui cette analyse n'aurait pas été possible. Nous remercions les nombreuses personnes impliquées dans la collecte et la mise à disposition des données mondiales et avons conscience des ressources considérables en personnels et en temps consacrées à la collecte de ces données inestimables. Nous n'oublions pas de remercier les ingénieurs qui ont écrit les programmes permettant de traiter ces données, de les mettre en ligne et de les rendre facilement accessibles aux utilisateurs.

Références

- Balesdent J. et Recous S., 1997. Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français. *Can. J. Soil. Sci.*, 77, pp.187-193
- Blume H. P. et al., 2015. *Scheffer/schachtschabel soil science*. Springer Berlin Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-642-30942-7
- Bopp L., Bowler C., Guidi L., Karsenti E., de Vargas C. (2019) The Ocean: A Carbon Pump. Plateforme Océan & Climat-Fiches scientifiques. https://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2017/03/ocean-carbon-pump_07-2.pdf
- Burton M.R., Sawyer G.M., Granieri D., 2013. Deep Carbon Emissions from Volcanoes. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* Vol. 75 pp. 323-354. Doi: 10.2138/rmg.2013.75.11
- Caillon N. et al., 2003. Timing of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature Changes Across Termination III. *Science* 299, 1728; Doi : 10.1126/science.1078758.

- Carr M. E., et al., 2006. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color, *Deep Sea Res., Part II*, 53, 741 – 770.
- FAO (2018). Rice Market Monitor. Volume XXI, Issue No. 1, April 2018.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/07b6c7b4-065b-47ac-88d5-bbdafcb2baae/content>
- FAO, 2024. La production mondiale des pêches et de l'aquaculture atteint un nouveau record. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report-global-fisheries-and-aquaculture-production-reaches-a-new-record-high/fr>
- FAO, 2025. Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales.
<https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/>
- FAO (n.d.). FAOSTAT Data. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Fay A.R et al., 2023. Updated climatological mean delta fCO₂ and net sea–air CO₂ flux over the global open ocean regions. *Earth System Science Data*, Doi: 10.5194/essd-2023-429
- Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D., & Deck, B. (1999). Ice Core Records of Atmospheric CO₂ around the Last Three Glacial Terminations. *Science*, 283, 1712-1714. <https://doi.org/10.1126/science.283.5408.1712>
- Friedlingstein P. et al., 2023. Global Carbon Budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5301–5369. Doi: 10.5194/essd-15-5301-2023
- Friedlingstein P. et al., 2022. Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900, Doi: 10.5194/essd-14-4811-2022
- Global CCS Institute, 2023. Global Status of CCS Report.
<https://status23.globalccsinstitute.com/>
- Gundersen P., 2021. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*. Doi: 10.1038/s41586-021-03266-z
- Haverd, V. et al., 2020. Higher than Expected CO₂ Fertilization Inferred from Leaf to Global Observations. *Global Change Biology*, 26, 2390-2402. Doi: 10.1111/gcb.14950).
- Hay R. K. M., 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126: 197-216.
- Huang J. et al., 2018. The global oxygen budget and its future projection. *Science Bulletin* 63, 1180–1186
- ING, 2013. Les flux de bois en forêt. <https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/flux2016.pdf>
- IPCC, 2006a. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 2: Stationary combustion.
- IPCC, 2006b. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5: Cropland.
- IPCC, 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5: Cropland.
- Jia R. et al., 2025. A large global soil carbon sink informed by repeated soil samplings. *bioRxiv preprint*. Doi: 10.1101/2025.04.25.650716

- Johnson K.S. & Bif M.B., 2021. Constraint on net primary productivity of the global ocean by Argo oxygen measurements. *Nat. Geosci.* 14, 769–774. Doi: 10.1038/s4156102100807z
- Keeling C. D. et al., 2001. Exchanges of atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages.
- Kobashi T. et al., 2013. On the Origin of Multidecadal to Centennial Greenland Temperature Anomalies over the Past 800 yr. *Climate of the Past*, 9, 583-596. Doi: 10.5194/cp-9-583-2013
- Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (1997). <https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsgno=XXVI I-7-a&chapter=27&clang=en>
- Le Quéré C. et al., 2013. Global carbon budget 2013, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 6(2), 689–760, Doi: 10.5194/essdd-6-689-2013.
- Luyssaert, S. et al. (2008). Old-Growth Forests as Global Carbon Sinks. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Luyssaert, S. et al. (2021). Reply to: Old-Growth Forests Carbon Sinks Overestimated. *Nature*, 591, 24-25. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03267-y>
- Maréchal A., 2022. Quelles sont les émissions de GES de l’agriculture ? <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/quelles-sont-les-pistes-pour-reduire-les-emissions-de-lagriculture/comment-reduire-les-emissions-de-ges-dans-lagriculture/>
- Marx U., Roles J., Hankamer B., 2021. Sargassum blooms in the Atlantic Ocean – From a burden to an asset. *Algal research* 54 (6448):102188 doi.org/10.1016/j.algal.2021.102188
- McGillis W. R. et al. 2004. Air-sea CO₂ exchange in the equatorial Pacific, *J. Geophys. Res.*, 109, C08S02. Doi: 10.1029/2003JC002256.
- Met Office Hadley Centre, 2022. 2021 continues warm global temperature series, Grahame Madge. <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/news-and-media/media-centre/weather-and-climate-news/2022/2021-hadcrut5-wmo-temperature-statement>
- Mottet A. et al., 2017. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Secur.* 14, 1–8. Doi: 10.1016/j.gfs.2017.01.001
- Muller-Feuga A., 2024a. The Recognition of Carbon Capture and Storage by Plants, *Journal of Agricultural Science*, 16, 7. Doi: 10.5539/jas.v16n7p1
- Muller-Feuga A., 2024b. Plant Cultivation: A Strong and Sustainable Response to CO₂ Emissions. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12, 68-88. Doi: 10.4236/gep.2024.121005
- Muller-Feuga A., 2025. The 50-Year CO₂ Balance: Crucial Roles of Agriculture, Forestry and the Ocean. *Great Britain Journals Press*, Vol 24 Issue 15. Doi: 10.34257/LJRSVOL24IS15PG1

- NASA, 2016. Carbon Dioxide Fertilization Greening Earth, Study Finds by Karl B. Hille. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/goddard/carbon-dioxide-fertilization-greening-earth-study-finds/>
- NOAA n.d. The Surface Ocean CO₂ Atlas. <https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/SOCAT>
- Pan Y., et al., 2024. The enduring world forest carbon sink. *Nature* 631, 563–569 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
- Pellerin S., et al., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 pp.
- Petit J. R. et al., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399. Doi: 10.1038/20859
- Richet P., 2021. Le climat et la relation température-CO₂ : Un réexamen épistémologique du message des carottes glaciaires. Translated from an article submitted to *History of Geo- and Space Sciences*, 12, 97-110.
- Ritchie H. and Roser M., 2024. CO₂ emissions. Published online at OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Global Change Data Lab. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Rödenbeck C. et al., 2015. Data-based estimates of the ocean carbon sink variability – first results of the Surface Ocean pCO₂ Mapping intercomparison (SOCOM). *Biogeosciences*, 12, 7251-7278. Doi: 10.5194/bg-12-7251-2015
- Saugier B., Roy J., Mooney HA., 2001. Terrestrial global productivity. London: Academic Press. US\$99.95 (hardback). 573 pp.
- Sorokhtin O.G., Chilingar G.V., Khilyuk L.F., 2007. Global Warming and Global Cooling Evolution of Climate on Earth. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 5, xi-xvi, 1313. Doi: 10.1016/S1571-9197(06)05001-4
- The Mainichi, 2025. A glimpse into how Japanese gov't stores 910,000 tons of rice while preserving quality. Japanese original by Satoshi Fukutomi, Business News Department.
- Tieszen L.L. et al., 1983. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia*, Springer-Verlag, 57:32-37.
- Tijero V. et al., 2021. Fruit Development and Primary Metabolism in Apple. *Agronomy* 2021, 11, 1160. Doi: 10.3390/agronomy11061160
- Vidal E. et al., 2020. Sustainable forest management (SFM) of tropical moist forests: the case of the Brazilian Amazon. In *Achieving sustainable management of tropical forests*. Eds
- Walker A. P. et al., 2021. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂, *New Phytol.*, 229, 2413–2445, Doi: 10.1111/nph.16866, 2021.

- Wang J. et al., 2017. Soil and vegetation carbon turnover times from tropical to boreal forests. *Funct Ecol.* 32: 71–82. Doi: 10.1111/1365-2435.12914
- Wolf J. et al., 2015. Biogenic carbon fluxes from global agricultural production and consumption, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, 1617–1639, Doi: 10.1002/2015GB005119.
- Zhong, G. et al. (2024). The Southern Ocean Carbon Sink Has Been Overestimated in the Past Three Decades. *Communications Earth & Environment*, 5, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01566-6>