



Échanges gazeux avec l'atmosphère

Les sols influent sur le climat via le cycle de l'eau et les échanges gazeux. Ils stockent du carbone atmosphérique (CO_2), grâce à la photosynthèse des végétaux sous forme de matière organique. Ils captent de l'azote (N_2) par l'activité microbienne (symbioses). Par l'activité des organismes qu'ils hébergent (faune et micro-organismes), ils émettent aussi naturellement des gaz à effet de serre (GES), le CO_2 , le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O). Les modes de gestion des sols influencent ces processus et donc les quantités de GES dans l'air et le climat.

Rédaction : Sophie Raous & Claire Chenu (avril 2023)

Les sols **échantent** en permanence **différents gaz avec l'atmosphère**, agissant comme **puits** ou **source** selon les conditions **pédoclimatiques** et l'usage des sols. Les organismes du sol, particulièrement sensibles aux conditions du milieu et à leurs variations, sont impliqués dans les processus d'émission ou d'absorption de gaz (cf. Synthèse « Air »).

L'atmosphère terrestre est constituée de 78,1 % d'**azote**, 21 % d'**oxygène** et de 0,9 % d'**argon** pour les gaz majeurs. Les gaz mineurs, dont la proportion varie avec l'altitude, sont principalement l'**eau** sous forme de vapeur, le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre et l'ozone. Au-delà de la **vapeur d'eau** et du **dioxyde de carbone**, les sols échantent également du **méthane** (CH_4) et du **protoxyde d'azote** (N_2O) avec l'atmosphère (Figure 1).

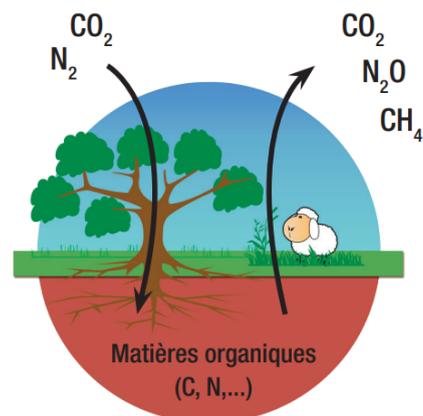


Figure 1. Les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère.
Issu de l'exposition « Les sols et le changement climatique » - CESE / AgroParistech 2014

La vapeur d'eau

Les échanges d'eau sol-végétation-atmosphère résultent en partie des échanges d'énergie existant entre la surface de la Terre et l'atmosphère. En effet, à l'échelle du globe terrestre, environ la moitié de l'énergie solaire qui arrive au sommet de l'atmosphère atteint la surface de la Terre et **près de la moitié de cette énergie sert à évaporer l'eau présente en surface**.

Source majeure de vapeur d'eau dans l'atmosphère, l'évaporation consomme de l'énergie pour faire passer l'eau de surface de l'état liquide à l'état vapeur. Les **océans**, les **mers**, les



lacs et les **rivières** fournissent approximativement **86 % de l'humidité atmosphérique**, les 14 % restants provenant de l'évaporation des surfaces continentales. Mais nombreuses sont, parmi ces dernières, celles qui évaporent peu, comme les déserts ou les surfaces recouvertes de glace ; **les surfaces végétales et les sols jouent ainsi un rôle capital dans le cycle de l'eau global.**

L'**évaporation** des surfaces continentales se compose pour l'essentiel de l'évaporation directe qui s'effectue à partir des différents plans d'eau (surfaces saturées) et des sols plus ou moins humides et de la transpiration des végétaux. Dans le cas d'un sol nu, seule la diffusion de l'eau vers la surface alimente l'évaporation, alors que dans le cas d'un couvert végétal, c'est la diffusion vers le chevelu racinaire de l'eau contenue dans tout le volume de sol exploré par les racines qui alimente la transpiration, à savoir la libération de vapeur d'eau par les stomates (orifice de petite taille présent dans l'épiderme des feuilles).

L'absorption de gaz carbonique par la plante s'effectuant également par les stomates, **transpiration et photosynthèse sont dans le cas général étroitement liées.** Environ 95 % de l'eau transitant par la plante sont transpirés et seuls 5 % environ sont utilisés par son métabolisme.

Depuis plus d'un siècle, les **activités humaines amplifient l'effet de serre**, principalement par l'émission de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O). Si la combustion de carburants fossiles est à l'origine de la majorité des émissions de CO_2 d'origine anthropique, les sols seraient par contre à l'origine d'un tiers des émissions planétaires de méthane et des deux tiers de celles de N_2O . Toutefois, les sols interviennent sur la régulation des flux de GES en stockant du carbone et en absorbant du méthane.

Le dioxyde de carbone

A l'échelle mondiale, on estime que le premier mètre de sol représente un **réservoir de carbone 2 à 3 fois plus important que la biomasse végétale ou l'atmosphère** (Figure 1). Chaque année 30 % du dioxyde de carbone émis par les activités humaines est récupéré par les plantes grâce à la photosynthèse. Quand les plantes meurent et se décomposent, les organismes du sol tels que les bactéries, les champignons ou les organismes de la faune du sol tels que les vers de terre transforment cette biomasse végétale en matière organique (MO). Cette MO constituée pour moitié de carbone est essentielle à la fertilité des sols, notamment car elle retient l'eau, et qu'elle est pour partie constituée d'azote et de phosphore qu'elle libère en se décomposant, éléments indispensables à la croissance des plantes (cf. Synthèses « Matière organique » et « fourniture de nutriments »). Lorsque la biomasse végétale se décompose est décomposée, l'essentiel du carbone (env. 85 %)



LA FRESQUE DU SOL

retourne à l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone dans l'année, le reste persiste dans le sol pour des durées longues. **Le sol stocke ainsi du carbone sous forme de molécules organiques, et ce pour des durées variables, qui sont en moyenne de plusieurs décennies. Il contribue ainsi à réguler la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère.** On estime ainsi que si on diminuait le stock de carbone des sols du monde de 0,4 % par an ou 4 pour mille dans les 40 premiers centimètres du sol, cela doublerait le flux net de CO₂ actuel de notre planète vers l'atmosphère et aggraverait donc de manière dramatique l'effet de serre. Inversement, augmenter les stocks de C des sols du monde de 4 pour mille par an reviendrait à stopper l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. **L'initiative 4 pour 1000** tire son nom de ces constats et propose de protéger et si possible d'augmenter les stocks de C des sols, pour la sécurité alimentaire, l'adaptation au changement climatique et l'atténuation du changement climatique (Figure 1). En France, l'évolution des stocks de carbone des sols agricoles et forestiers se situe actuellement entre - 0,2 et + 3,2 pour mille par an 5, avec une grande hétérogénéité spatiale. Certaines régions montrent des pertes, d'autres un enrichissement.

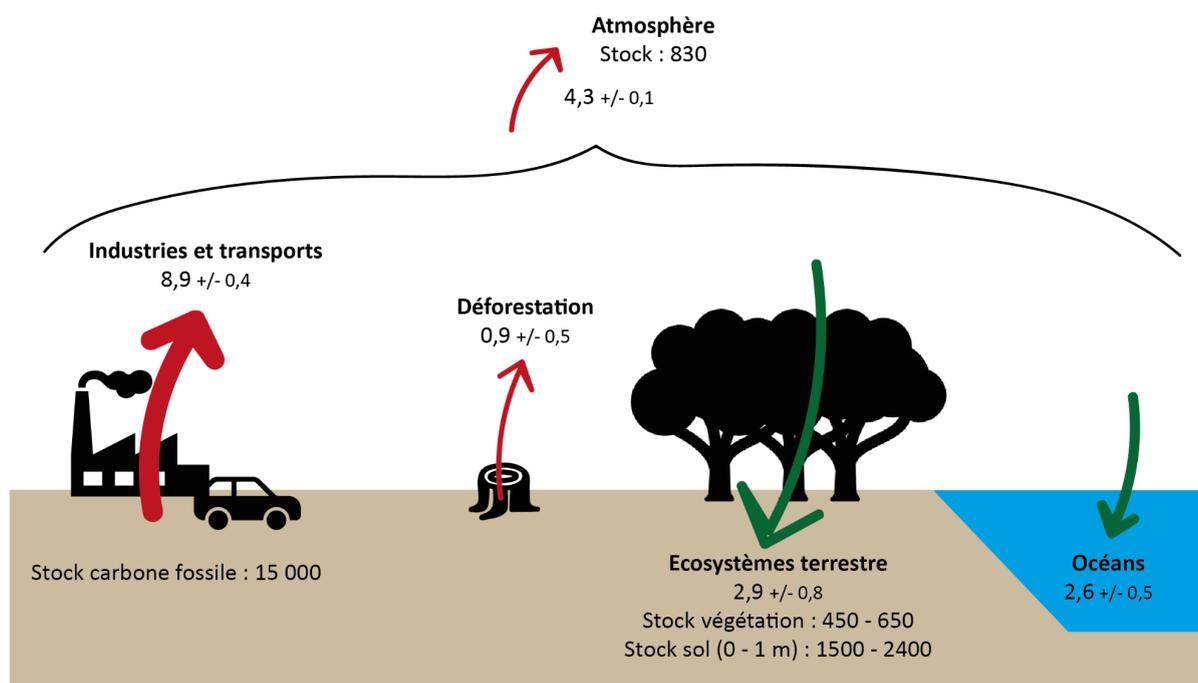


Figure 2. Stocks et flux de carbone entre la terre et l'atmosphère (en milliards de tonnes). En vert est indiqué le carbone stocké, en rouge le carbone libéré. Les flux de carbone correspondant à la respiration et la photosynthèse étant à l'équilibre, ils ne sont pas représentés sur cette figure.

Source : Solenn Chauvel d'après Le Quéré et. al. (2014).



Le changement climatique a lui aussi des retombées sur les stocks de carbone dans le sol. En augmentant la température, on augmente aussi fortement la vitesse de minéralisation des matières organiques et donc les pertes de carbone dans les sols.

Le protoxyde d'azote et le méthane

Les sols contribuent aussi très fortement aux émissions de protoxyde d'azote via la fertilisation azotée et de méthane, notamment en zones humides. Le **méthane est produit par des micro-organismes** :

- dans les sols submergés (prairies humides, tourbières, rizières, etc.) par transformation des matières organiques en l'absence d'oxygène.
- dans les sols non submergés, d'autres micro-organismes absorbent le méthane atmosphérique et le transforment en dioxyde de carbone en présence d'oxygène.

Le protoxyde d'azote est émis par les sols lors de la dénitrification ou de la nitrification, deux processus majeurs du cycle de l'azote dans le sol :

- La dénitrification apparaît dans des sols appauvris en oxygène lorsque certaines populations microbiennes modifient leur respiration en utilisant les ions nitrate et nitrite du sol à la place de l'oxygène.
- En conditions de bonne aération, d'autres micro-organismes oxydent l'ammonium en nitrites puis en nitrates : c'est la nitrification.

Le protoxyde d'azote est un sous-produit de ces deux processus.

Les **caractéristiques du milieu** et leurs **variations spatio-temporelles** influencent l'**activité des micro-organismes** impliqués dans les émissions de GES par les sols. Les conditions d'aération des sols, conditionnées par le climat, les pratiques agricoles et le fonctionnement hydrique des sols sont déterminantes sur le fonctionnement de ces processus et l'intensité des émissions de méthane et de protoxyde d'azote. Les émissions de protoxyde d'azote sont clairement sous la dépendance des apports d'azote aux sols, fertilisation minérale ou organique (selon l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* 1 % des apports d'azote au sol est émis sous forme de N₂O).

Activités humaines et émissions de GES par les sols

Les **activités humaines** peuvent affecter fortement et rapidement les sols et les émissions de gaz à effet de serre par :



LA FRESQUE DU SOL

- **les changements d'occupation des sols** comme la mise en culture d'une prairie ou l'artificialisation qui aboutiront à un déstockage de carbone et à des émissions accrues de protoxyde d'azote.
- **l'effet des pratiques des agriculteurs et des forestiers** qui peuvent influencer le stockage de carbone et limiter les émissions de gaz à effet de serre : gérer les apports de fertilisants (ex : introduction de légumineuses dans les rotations qui permettent de limiter la fertilisation azotée, ajustement des doses et de la localisation de la fertilisation azotée permet de réduire les émissions de N_2O), couvrir le sol par de la végétation (culture intercalaires, enherbement des vignes et vergers, plantation de haies, agroforesterie...), favoriser le retour au sol des matières organiques (ex: apports de composts, restitution des pailles et des rémanents forestiers) permettent d'augmenter les stocks de carbone des sols. Limiter le travail du sol limite l'érosion et donc la perte des matières organiques associées à la terre érodée.

Il n'est cependant pas évident d'aborder stockage de carbone et émissions de N_2O et méthane en même temps car tout ne va pas toujours dans le même sens : ce n'est pas parce qu'une pratique stocke du carbone qu'elle va forcément limiter les émissions de méthane et protoxyde d'azote.

Il n'y a **pas de solution unique**, il est important d'adapter les solutions en fonction du contexte pédoclimatique dans lequel on se trouve. En effet, si on prend l'exemple du labour, dans certains contextes pédoclimatiques l'arrêt du labour va permettre de ralentir la minéralisation des matières organiques (moins d'aération donc moins d'activité biologique) quand cela n'aura pas ou peu d'effet dans d'autres contextes.



Agriculture de conservation



Enherbement des vignes

Figure 3. Exemple de pratiques limitant le retour à l'atmosphère du carbone. Issu de l'exposition « Les sols et le changement climatique » - CESE / AgroParistech 2014

Source photo : Claire Chenu



Bibliographie

Chenu, C., 2022 Agriculture : le stockage de GES dans les sols est prometteur. La revue polytechnique de Paris. <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/quelles-sont-les-pistes-pour-reduire-les-emissions-de-lagriculture/agriculture-le-stockage-de-ges-dans-les-sols-est-prometteur/#note-5>

Chenu, C. et. al. Exposition "Les sols et le changement climatique". 2014, CESE <https://www.afes.fr/ressources/expositions-sur-les-sols/expositions-physiques-gerees-par-la-fes/>

Chenu, C., Chotte, J.L., Luu, P. 2022. Le stockage de carbone dans les sols. RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT - JANVIER 2022 - N°105 © Annales des Mines. <https://www.anales.org/re/2022/re105/2022-01-14.pdf>

GisSol, Rapport sur l'état des sols de France RESF. 2011, https://www.gissol.fr/rapports/Rapport_HD.pdf

INRAE, 2019. Stocker 4 pour 1 000 de carbone dans les sols : le potentiel en France. Résumé en 12 pages : https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Etude_4pour1000_RESUME_Novembre%202020.pdf

Pellerin et al. 2013 - Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Etude INRA. Résumé en 8 pages <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/45660fc2ed421729a1f61fe165172062.pdf>

Site de l'INSEE : chiffres sur le changement climatique : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277613?sommaire=4318291>

Site de l'Intergovernmental Panel on Climate Change : <https://www.ipcc.ch>

Site du Groupement d'intérêt Scientifique sur les SOLs (GIS Sol) : <https://www.gissol.fr/thematiques/sol-et-attenuation-du-changement-climatique-87>

Tuzet, A. , Brunet, Y. 2017. L'eau à découvert. CNRS Editions. <https://books.openedition.org/editions-cnrs/9887>