

Potentiel de captage de CO₂ par l'humus

Mécanisme de captage

L'humus est la matière organique stable du sol, résultant de la transformation de la matière végétale et animale. Il joue un rôle crucial dans le stockage du carbone issu du CO₂ et la libération de l'oxygène dans l'atmosphère. L'humus contient 58 % de carbone.

Une augmentation d'humus de 1 % du poids des 25 cm de la couche supérieure du sol permet de capter environ 76 tonnes de CO₂ par hectare [1].

Ce calcul repose sur le mécanisme de la photosynthèse qui fixe le carbone du CO₂ et libère l'oxygène dans une proportion de 44/12 (poids moléculaire du CO₂ divisé par celui du carbone), soit un facteur de 3,67. Ainsi, 1 tonne d'humus contenant 0,58 tonne de carbone correspond à 2,13 tonnes de CO₂ séquestré ($0,58 \times 3,67$) [2].

Cette capacité est particulièrement intéressante dans le contexte de l'agriculture conventionnelle, où les sols sont appauvris en matière organique, souvent en dessous de 1 %, ce qui provoque une baisse de la production malgré une augmentation des engrais azotés. Il faut encore prendre en compte que cette forme d'agriculture est responsable d'une part significative des émissions de gaz à effet de serre (GES) par manque d'oxygène (O₂), notamment de CO₂, de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O), contribuant à la dégradation des sols et de la biodiversité [3].

Le moment est venu de changer les modes de production. On remarque de plus en plus que les agriculteurs proches de la production bio ont un rendement proche, voire supérieur aux cultures intensives utilisant des engrais de synthèse. Dans le même sens, le mouvement lancé lors de la COP 21 en décembre 2015, l'Initiative internationale « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », vise à montrer que l'agriculture, et en particulier les sols agricoles et forestiers, peuvent jouer un rôle majeur. Un taux de croissance annuel de 0,4 % des stocks de carbone du sol (4‰ par an) dans les premiers 30 à 40 cm de sol réduirait de manière significative la concentration de CO₂ atmosphérique liée aux activités humaines [4].

Avantages de l'humus par rapport aux méthodes alternatives techniques par injection de CO₂

- Sécurité et innocuité : Contrairement au stockage géologique, l'humus ne présente aucun danger. Il transforme les productions de carbone organique que les arbres et les plantes ont produites en rejetant de l'oxygène. Le CO₂ n'est pas simplement stocké sous pression, il est intégré biologiquement, sans problème d'acidification du sol et de l'eau [5].
- Coût et valorisation : Actuellement, le prix payé pour les certificats de captage de CO₂ agricole semble être au maximum de 0,50 euro, ce qui est sous-évalué. La société Humus a restreint la recherche de l'humus dans les 25 premiers centimètres du sol par facilité. C'est la couche qui contient le plus d'humus, mais il y a de l'humus beaucoup plus profond, surtout s'il y a beaucoup de vers de terre. La quantité totale d'humus à l'hectare devrait être prise en compte pour le calcul des certificats [6].

- Rapidité d'action : Il suffit d'un épandage de 5 cm de matière ligneuse ou 25 cm de matière cellulosique pour augmenter en une année la matière organique de 1 % [7].
- Bénéfices annexes : Amélioration de la fertilité des sols, augmentation de la biodiversité, meilleure rétention d'eau, développement des vers de terre, réduction des sécheresses et des inondations, stabilisation des pentes (moins de glissements de terrain).



- Rôle des vers de terre : Les vers de terre font des galeries profondes, gainées par des spirales de racines. Ces galeries sont stables et permettent le développement de l'humus en profondeur (plus d'un mètre). Ils permettent une meilleure pénétration de l'eau. L'air peut pénétrer profondément dans le sol et de nombreuses bactéries permettent une minéralisation de l'azote de l'air qui devient résorbable par les plantes, ce qui minimise le besoin d'engrais azotés [8].
- Impact économique : L'argent de la vente de certificats CO₂ permettra le développement de l'agriculture biologique qui pourra baisser ses prix et augmenter sa production pour le bien de la santé des consommateurs et des agriculteurs.

Compte tenu des nombreux avantages de cette technique par rapport aux techniques par injection, les politiques devraient absolument soutenir cette méthode.

Méthodes alternatives techniques par injection de CO₂

Les méthodes techniques de captage et stockage du CO₂ (CCS) consistent à capter le CO₂ émis par des sources industrielles, à le transporter, puis à l'injecter dans des formations géologiques profondes, telles que des aquifères salins ou d'anciens gisements pétroliers. Une autre méthode est l'injection directe dans le milieu marin, où le CO₂ est piégé sous forme liquide ou solide. Ces technologies sont encore en phase de développement et de déploiement, avec des projets pilotes en Europe, notamment en Norvège (projet Northern Lights) [9].

Les coûts du CCS sont estimés entre 50 € et 150 € par tonne de CO₂ injectée, incluant la capture, le transport, l'injection et la surveillance des sites. Ces coûts sont élevés en raison des infrastructures nécessaires, des risques de fuite et des mesures de sécurité [10].

Risques et dangers du CCS

- Acidification des sols et aquifères : L'injection de CO₂ peut modifier le pH des sols et des nappes phréatiques, affectant la qualité de l'eau et des écosystèmes locaux.
- Fuites de CO₂ : Le CO₂ injecté peut fuir vers l'atmosphère, réduisant l'efficacité du stockage et posant des risques pour la sécurité des populations voisines.
- Sismicité induite : L'injection de fluides sous pression peut provoquer des micro-séismes, potentiellement dangereux.

- Impacts sur les écosystèmes marins : L'injection en milieu marin peut perturber les écosystèmes et la biodiversité (particulièrement les récifs coralliens avec leurs structures calcaires) [11].

Inconvénients majeurs : Coûts élevés, risques environnementaux, dépendance aux infrastructures industrielles. Ces techniques ne détruisent pas le CO₂ qui reste un agent acidifiant puissant dont on ne mesure pas la dangerosité au niveau de la stabilité des roches et des animaux, notamment les coraux.

Potentiel de captage de CO₂ et financier sur les surfaces de l'agriculture conventionnelle

Il semble que la diminution de l'humus soit due principalement au nitrate d'ammonium. La grande majorité des agriculteurs conventionnels utilisent cet engrais.

Calcul du potentiel pour la France

La surface agricole conventionnelle peut être estimée en soustrayant à la surface agricole utilisée totale le pourcentage de l'agriculture biologique (9,7 %) [12].

Soit 90,3 % de 28 millions d'hectares, ce qui représente environ 26 millions d'hectares. L'agriculture conventionnelle ayant un grand potentiel d'augmenter l'humus dans leur sol qui est actuellement très bas.

Cela donne un potentiel de captage stable de CO₂ pour 1 % d'augmentation d'humus dans les exploitations agricoles conventionnelles de 1,742 milliard de tonnes (estimation 67 t/hectare en prenant une couche de 25 cm).

Cela représente un potentiel de revenus par la vente de certificats. Si l'on se base sur un prix du carbone de marché (EU ETS) oscillant récemment entre 70 et 85 € la tonne [13], le revenu potentiel serait bien supérieur aux estimations basses. À 50 € la tonne, cela représente 3 350 € par hectare, soit pour une superficie moyenne de 111 hectares par exploitation : 371 000 €, et globalement, au niveau de la France, un potentiel de plusieurs dizaines de milliards d'euros.

Calcul du potentiel pour la Suisse

Cela donne un potentiel de captage stable de CO₂ pour 1 % d'augmentation d'humus dans les exploitations agricoles conventionnelles de :

$1'450'000 \text{ ha} \times 76 \text{ t/ha} = 110 \text{ millions de tonnes de CO}_2 \text{ capté.}$

Valorisation financière

En se basant sur un prix de marché de 70 CHF la tonne de CO₂ (cours actuel EU ETS) [4] :

Par hectare : $76 \text{ t} \times 70 \text{ CHF} = 5\,320 \text{ CHF / ha} .$

Potentiel global pour la Suisse : $110 \text{ million de tonnes} \times 70 \text{ €} = \sim 7.7 \text{ milliards de CHF} .$

Références Bibliographiques et Sources

- [1] Humus et calcul de séquestration (Données de base) *Commentaire* : Source originale pour le calcul de séquestration dans les 25 premiers cm. *Lien* : <https://www.humusplus.at/humus-wissen/co2-bindung-durch-humusaufbau>
- [2] Facteur de conversion Carbone/CO₂ et chimie du sol *Commentaire* : Détail du ratio moléculaire (44/12 = 3,67) et teneur en carbone de l'humus. *Lien* : <https://4p1000.org/objectifs>
- [3] Gaz à effet de serre et impacts agricoles *Commentaire* : Définition des GES (CO₂, CH₄, N₂O) et leur lien avec les pratiques agricoles anaérobies. *Lien* : https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre
- [4] Initiative 4 pour 1000 *Commentaire* : Lancement COP 21, objectif de croissance de 0,4% du carbone du sol par an. *Lien* : <https://4p1000.org/>
- [5] Comparaison Humus vs Injection (Sécurité) *Commentaire* : Analyse des risques d'acidification liés au CCS vs sécurité biologique de l'humus. *Lien (Rapport risques CCUS)* : https://www.cre.fr/fileadmin/Documents/Rapports_et_etudes/2024/Rapport_CCUS_CRE.pdf
- [6] Valorisation économique et profondeur des sols *Commentaire* : Données FiBL sur la fixation du carbone en profondeur et limites des certifications actuelles. *Lien* : <https://www.fibl.org/fr/infotheque/message/analyse-globale-l-agriculture-biologique-fixe-du-carbone-dans-le-sol>
- [7] Fertilité du sol_ vers de terre 250814 : Vitesse de formation de l'humus (Apports de matière) *Commentaire* : Données pratiques sur les apports nécessaires (ligneux/cellulosique) pour 1% d'humus en un an.
- [8] Rôle des vers de terre (Anéciques et structure du sol) *Commentaire* : Travaux sur la bioturbation, galeries profondes et minéralisation de l'azote. *Sources* :
- Archive Marcel Bouché (Vers de Terre Production) : <https://www.verdeterreprod.fr/publications-de-marcel-bouche/>
 - Étude de cas SupAgro : https://www.supagro.fr/ress-pepites/EtudeCasThil/co/c2_VDT-aneciques.html **à voir absolument**
 - Rapport Terrenature (ATBA) : https://atba.ch/wp-content/uploads/2018/12/Terrenature_octobre-2017.pdf
- [9] Technologies CCS et projet Northern Lights *Commentaire* : État de l'art du stockage géologique et projets pilotes européens (Norvège). *Lien* : <https://norlights.com/how-to-store-co2-with-northern-lights/>
- [10] Coûts du CCS (Capture, Transport, Stockage) *Commentaire* : Estimations actualisées 2024-2025 des coûts par tonne (50-150€). *Lien (Rapport AIE/IEA)* : <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
- [11] Risques environnementaux du CCS (Sismicité, Fuites, Océans) *Commentaire* : Analyse des impacts écologiques et géologiques du stockage profond. *Lien (Encyclopédie de l'Énergie)* : <https://www.encyclopedie-energie.org/captage-et-stockage-du-carbone/>

[12] Statistiques surfaces agricoles (Bio vs Conventionnel) *Commentaire* : Correction des liens 404 par les données officielles Eurostat et Ministère français (2023-2024). *Lien (Ministère Agriculture France)* : <https://agriculture.gouv.fr/les-chiffres-cles-de-lagriculture-biologique-en-france-en-2023>
Lien (Eurostat) : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Organic_farming_statistics

[13] Prix du carbone (EU ETS) et potentiel financier *Commentaire* : Cours spot récents 2025-2026 (entre 70€ et 85€ la tonne), remplaçant l'estimation basse de 0,50€ pour les certificats volontaires. *Lien (EEX Market Data)* : <https://www.eex.com/en/market-data/emissions/spot-market> *Lien (Analyse marché 2026)* : <https://www.optima-energie.fr/blog/actualites/prix-carbone-evolution/>

Annexe : Détail des travaux de Marcel Bouché (Archives)

Suite à votre demande concernant les Archives Marcel Bouché, voici les éléments identifiés à partir du fonds documentaire diffusé par *Ver de Terre Production* et les bases de données scientifiques. Marcel Bouché a offert plus de 400 publications à la diffusion publique.

Titres majeurs disponibles dans les archives

1. "Lombriciens de France : écologie et systématique" (Thèse d'État, 1972) – Ouvrage de référence définissant les catégories écologiques (épigés, endogés, anéciques).
2. "Des vers de terre et des hommes : Découvrir nos écosystèmes fonctionnant à l'énergie solaire" (Livre grand public, co-écrit avec Alain Canet).
3. Série des "Publications Unité (PU)" : Comprend plus de 200 rapports techniques (ex: PU 210 sur les transferts d'azote, PU 211 sur les métaux lourds).

Table des matières type (Reconstituée à partir de ses conférences et rapports sur les vers anéciques)

Ce sommaire reflète la structure récurrente de ses travaux sur le rôle des vers de terre :

1. Introduction : Le sol, épiderme de la Terre
 - Importance de la biomasse lombricienne comparée à celle des humains.
 - Historique des recherches (de Darwin à Bouché).
2. Systématique et Écologie des Lombriciens
 - Classification fonctionnelle : Épigés (surface), Endogés (profondeur horizontale), Anéciques (galerie verticale).
 - Cycle de vie et reproduction.
3. Ingénierie du sol par les vers anéciques
 - Création de la macroporosité : galeries verticales permanentes.
 - Rôle du mucus dans la stabilisation des parois (gainage).
 - Interaction avec les racines : les "spirales de racines" dans les galeries.
4. Hydrologie et Aération
 - Vitesse d'infiltration de l'eau dans un sol structuré par les vers (160 mm/h) vs sol nu (5-7 mm/h).

- Prévention du ruissellement, des inondations et de l'érosion.
 - Respiration du sol : apport d'O₂ en profondeur.
5. Cycle des nutriments et Carbone
- Minéralisation de l'azote atmosphérique par les bactéries associées aux galeries.
 - Séquestration du carbone en profondeur (>1 mètre) protégé de l'oxydation.
 - Impact des engrais azotés de synthèse (nitrate d'ammonium) sur la mortalité des vers.
6. Impacts des pratiques agricoles
- Effets du labour, des pesticides et de la mise à nu des sols.
 - Études de cas : prairies permanentes vs terres labourées.
7. Conclusion : Vers une agriculture de conservation
- Nécessité de nourrir les vers de terre (couverts végétaux, apports organiques).
 - Économie réalisée sur les intrants grâce à l'activité lombricienne.

Pour accéder aux 400 publications numérisées : <https://www.verdeterreprod.fr/publications-de-marcel-bouche/>