



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Office fédéral de l'environnement OFEV

Office fédéral de l'agriculture OFAG

Fiche technique

Utilisation de charbon végétal dans l'agriculture en Suisse

Risques et opportunités pour les sols et le climat

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), groupe de travail de Cercle Sol : Valeur d'intervention et évaluation des risques AGIR

Personnes de contact

Gudrun Schwilch, section Sols, OFEV, gudrun.schwilch@bafu.admin.ch

Regine Röthlisberger, division Climat, OFEV, regine.roethlisberger@bafu.admin.ch

Michael Zimmermann, secteur Systèmes agro-environnementaux et éléments fertilisants, OFAG, michael.zimmermann@blw.admin.ch

Rebecca Keusch, direction du groupe AGIR, rebecca.keusch@tg.ch

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch > [Thème Climat](#) > [Informations pour spécialistes](#) > [Extraction et stockage du CO2](#)

Cette fiche technique est également disponible en allemand et en italien.

La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2023

Cette fiche technique présente les dernières connaissances scientifiques relatives à l'utilisation de charbon végétal dans l'agriculture suisse ainsi que les exigences actuelles en la matière. Elle se conçoit avant tout comme un document informatif destiné aux praticiens et à l'administration et non comme une aide à l'exécution.

L'essentiel en bref

- Dans la présente fiche technique, on entend par charbon végétal (aussi appelé biocharbon, charbon vert ou encore biochar) le produit solide obtenu à partir de biomasse d'origine végétale fraîchement « carbonisée ». Le document décrit en particulier les propriétés des charbons végétaux obtenus par pyrolyse (chapitre 1).
- Afin d'éviter la diffusion de polluants organiques dans l'environnement, il est impératif de respecter le cadre réglementaire qui s'applique à la production, à la mise en circulation et à l'utilisation de charbon végétal (chapitre 2).
- La production privée de charbon végétal pour un usage personnel comporte des risques particuliers pour le fabricant ainsi que pour l'air et pour les sols (section 2.2.3).
- Disponibles en quantité limitée, les résidus organiques (biomasse) sont sujets à la concurrence. Plusieurs facteurs rentrent en compte pour déterminer le processus de valorisation idéal de la biomasse. Le processus de pyrolyse, par exemple, peut être optimisé du point de vue du rendement énergétique ou de celui du charbon végétal. La production de charbon végétal devrait dans toute la mesure du possible s'aligner sur la Stratégie de la Suisse en matière de biomasse (chapitre 3).
- L'impact du charbon végétal sur les sols et sur le climat dépend des matières premières employées et des conditions de pyrolyse. Pour les sols suisses, contrairement à ce qui a pu être montré pour des sols tropicaux, il ne faut pas s'attendre à des hausses de rendement agricole accompagnées d'un fort potentiel de stockage du carbone (chapitre 3). Il y a lieu de veiller à ce que l'apport de charbon végétal à des fins de protection du climat n'ait pas de répercussions négatives sur la qualité des sols.
- Les recherches effectuées jusqu'à présent en Suisse n'ont pas pu prouver qu'un apport de charbon végétal améliorerait le rendement de la production agricole (section 3.1).
- Quoi qu'il en soit, différentes incertitudes subsistent concernant l'utilisation de charbon végétal dans l'agriculture, notamment pour ce qui est des conséquences à long terme pour les sols et les organismes du sol (sections 3.1 et 3.3). Les conséquences, qui peuvent être irréversibles, dépendent des caractéristiques du site et des propriétés du charbon végétal. Le charbon végétal est utilisé également en dehors de l'agriculture, par exemple dans les substrats techniques pour les arbres en zones urbaines ou comme matériau d'isolation des bâtiments (section 3.1).
- Le charbon végétal peut participer à l'atténuation des changements climatiques. Pour les sols agricoles suisses, les différents impacts potentiels sur le climat sont cependant limités et ne peuvent être estimés que de manière imprécise étant donné que la quantification repose sur de nombreuses hypothèses (section 3.4).
- Aujourd'hui, l'utilisation de charbon végétal dans l'agriculture n'est en général pas rentable sur le plan économique (section 3.4).
- Il est nécessaire de poursuivre les recherches pour combler les lacunes existantes et ainsi mieux comprendre les conséquences à long terme du charbon végétal sur les propriétés et les organismes du sol. Par ailleurs, des écobilans sont nécessaires qui comparent différents moyens de valorisation de la biomasse avec et sans production de charbon végétal (section 3.5).
- En vertu du principe de précaution, il est déconseillé d'utiliser du charbon végétal sur de grandes surfaces tant que des effets nocifs, par exemple sur les organismes du sol, ne peuvent pas être exclus. Sur la base des exigences et des connaissances scientifiques actuelles, le chapitre 4 tire des conclusions sur l'utilisation de charbon végétal dans l'agriculture.

1 Bases

Dans la présente fiche technique, on entend par charbon végétal (aussi appelé biocharbon, charbon vert ou encore biochar) le produit solide obtenu à partir de biomasse d'origine végétale fraîchement « carbonisée ». Le charbon végétal apporté aux sols est en principe du charbon végétal obtenu par pyrolyse¹. La pyrolyse s'effectue à des températures allant de 350° à 1000° Celsius, sous la pression atmosphérique, dans un milieu presque dépourvu d'oxygène (anaérobie). Le processus dure de quelques minutes à plusieurs heures [60] [67]. En théorie, on peut envisager d'utiliser n'importe quel type de biomasse pour la production de charbon végétal ; toutefois, la Suisse exige le respect de certains critères (voir chapitre 2).

Le charbon végétal se caractérise par une teneur en carbone relativement élevée (bois : 75 % à 95 %), qui dépend notamment des matières premières employées et du processus de production (entre autres de la température de pyrolyse) [59] [60] [67]. Il peut posséder une très grande surface spécifique (supérieure à 100 m²/g), ce qui peut favoriser des lieux d'échange pour les nutriments et améliorer la capacité de rétention d'eau des sols, mais aussi retenir les polluants [60] [67]. On notera toutefois que l'efficacité et la stabilité du charbon végétal dans l'agriculture et dans l'environnement ne dépendent pas uniquement des propriétés intrinsèques de celui-ci, mais également de facteurs pédoclimatiques [44] [60] [67].

La structure chimique du charbon végétal lui permet d'être stable dans l'environnement durant de nombreuses années [49] [60] [67]. Bien qu'on ne dispose actuellement que de très peu de résultats issus d'essais de longue durée, en particulier pour les sols situés sous des latitudes tempérées comme en Suisse, les données récoltées jusqu'à aujourd'hui laissent penser que le charbon végétal apporté aux sols perd relativement peu de carbone : au cours de la pyrolyse, environ la moitié du carbone présent dans le matériau d'origine est transformé en matières gazeuses et le reste est converti en charbon végétal. Après épandage, la majeure partie du carbone présent dans ce charbon végétal persiste dans les sols alors que, en comparaison, seule une faible proportion de biomasse non pyrolysée persisterait. Le charbon végétal se décompose plus rapidement pendant les premières années ; sur le long terme la décomposition ralentit. Durant cette période, le stockage du carbone puisé dans l'atmosphère par la photosynthèse, puis stocké sous forme de charbon végétal dans les sols, a un effet bénéfique sur le climat.

La carbonisation par pyrolyse de la biomasse est une réaction exothermique. En d'autres termes, elle dégage de l'énergie. La pyrolyse n'est pas sans risques : des polluants tels que des métaux lourds ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent s'accumuler dans le charbon végétal ou être générés si le procédé n'est pas géré de manière optimale (voir section 2.2) [67]. Peuvent s'ensuivre une pollution de l'air et de l'environnement par des effluents gazeux ainsi qu'une contamination des sols par l'apport du charbon végétal. Une pratique professionnelle permet d'éviter ce dernier cas.

Si cette possibilité d'utilisation de la biomasse sous forme de charbon végétal peut déboucher sur des flux de matière intéressants, elle pourrait aussi renforcer les utilisations concurrentes entre les domaines de l'énergie, des denrées alimentaires, de l'alimentation pour animaux et de la gestion de l'humus [51] [53] [73].

En outre, des valeurs empiriques à long terme représentatives des conditions de terrain et des méthodes d'exploitation typiques et locales font défaut. Par conséquent, de grandes incertitudes subsistent dans l'évaluation de l'impact du charbon végétal apporté aux sols [67].

¹ Il existe aussi la carbonisation hydrothermale (HTC), un autre procédé de conversion en charbon réalisé à température élevée (180° à 250° Celsius, avec apport d'eau) et sous pression (de 20 à 50 bars) [66] [67].

2 Exigences liées à la production et à l'utilisation de charbon végétal

L'utilisation de charbon végétal doit s'inscrire dans les politiques et stratégies actuelles. Il y a lieu de tenir compte en particulier de la politique climatique [15] [17], de la politique énergétique [6] [20], de la Stratégie Sol Suisse [22], de la Stratégie Biodiversité Suisse [14], de la Stratégie de la Suisse en matière de biomasse [18] et de la Politique de la ressource bois 2030 [16].

2.1 Vue d'ensemble des dispositions régissant la production et l'utilisation du charbon végétal

Les actes législatifs ci-après sont liés à la production et à l'épandage de charbon végétal. La loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) [4] a pour but de conserver durablement la diversité biologique et la fertilité des sols et de réduire assez tôt, à titre préventif, les atteintes qui pourraient devenir nuisibles ou incommodantes. L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) [8] décrit ce qu'on entend par sol fertile. L'ordonnance sur les engrais (OEng) [9] régit l'homologation, la mise en circulation, l'importation et l'utilisation d'engrais, et donc par là même de charbon végétal. L'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) [12] définit des exigences concernant la qualité des engrais remis et régit différentes restrictions et interdictions d'utilisation des engrais (détails voir annexe 2.6 ORRChim). La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) [5] entend protéger les eaux superficielles et les eaux souterraines contre toute atteinte nuisible. Elle dispose, entre autres, que les sols doivent être exploités de manière à ne pas porter préjudice aux eaux, en évitant notamment que les engrais ne soient emportés par ruissellement ou lessivage (voir également [19]). La loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN) [1] exige que la diversité biologique soit conservée. Par ailleurs, la loi sur l'agriculture (LAgr) [2] précise que la production agricole doit contribuer à la conservation des ressources naturelles. L'ordonnance sur les aliments pour animaux (OSALA) [10] régit les exigences s'appliquant aux aliments pour animaux et à leurs additifs. La production de charbon végétal doit respecter l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) [7], qui a pour but de protéger l'homme et l'environnement des pollutions atmosphériques nuisibles ou incommodantes. Selon la législation en vigueur sur le CO₂ (état le 1^{er} janvier 2023) [3] [11], les projets ayant recours à du charbon végétal sont autorisés à certaines conditions et peuvent donner lieu à des attestations de réduction des émissions pouvant être utilisées par exemple pour compenser des émissions de CO₂ générées par les transports [17]. L'ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ en vigueur limite notamment les quantités de charbon végétal utilisées dans ces projets à huit tonnes par hectare au cours de la période allant de 2022 à 2030 [11].

2.2 Matériau d'origine et production de charbon végétal

Pour éviter que le charbon végétal n'engendre une accumulation de polluants tels que des métaux lourds dans les sols, il faut veiller à choisir avec soin les matières premières employées dans le procédé de production [65] [67].

Lors du processus de fabrication du charbon végétal, les conditions de pyrolyse appropriées sont déterminantes pour minimiser la quantité de polluants – en particulier les HAP – générés par le procédé [67]. Les HAP peuvent s'échapper de l'installation de pyrolyse sous forme de polluants atmosphériques ou se condenser sur le charbon végétal.

2.2.1 Matériau d'origine

Seules des matières premières d'origine naturelle peuvent être employées. Afin de limiter la présence de polluants dans le charbon végétal et minimiser les dégagements de fumées, sont seules admissibles les matières suivantes : déchets naturels provenant des forêts, des champs et des jardins (aussi secs que possible) ainsi que bois à l'état naturel [7]. Il s'ensuit qu'il est interdit de fabriquer du charbon végétal avec du bois traité ou qui est contaminé par des substances étrangères (bois usagé, déchets de bois problématiques). Une telle utilisation entraînerait un danger particulier, car le procédé de pyrolyse pourrait générer des dioxines et des furanes hautement toxiques ou d'autres polluants (atmosphériques) [67].

De tels risques sont largement réduits lorsque le procédé a lieu dans des installations de pyrolyse professionnelles et dans le respect des directives de l'EBC (*European Biochar Certificate*) [65]. Le

certificat EBC définit une liste positive des matières premières à utiliser ainsi que les teneurs limites à respecter pour les concentrations de certaines substances.

2.2.2 Production commerciale

La production de charbon végétal génère des polluants atmosphériques potentiellement nocifs pour l'environnement, qui, en vertu de l'OPair doivent être réduits au strict minimum [7]. Il existe différents procédés de production et types d'installations [67] [68]. Une installation de pyrolyse commerciale sera nécessairement évaluée et autorisée par les autorités compétentes (canton, commune) et respectera les dispositions concernées de l'OPair (valeurs limites d'émission, captage et évacuation des émissions, etc.) [7].

2.2.3 Production pour un usage personnel

La production de charbon végétal pour un usage personnel, par exemple avec un four Kon-Tiki², doit également respecter les dispositions de l'OPair [7]. Sur la base de l'art. 4 OPair, l'autorité compétente peut définir à titre préventif des mesures visant à limiter les émissions ainsi que restreindre, voire prohiber, l'exploitation de certaines installations. Il faut s'assurer que le procédé ne génère dans l'ensemble que peu de fumée, un paramètre qui dépend fortement des caractéristiques et du taux d'humidité du combustible. Les polluants atmosphériques générés par le procédé peuvent porter atteinte aussi bien à la santé du fabricant qu'à l'environnement direct de l'installation. De plus, ces appareils à usage personnel présentent parfois des émissions comparativement élevées de méthane et de composés organiques volatils (COV) sans méthane (CH₄) [32], ce qui réduit leur utilité pour le climat et n'est pas souhaitable du point de vue de la protection de l'air. Par ailleurs, du point de vue de la protection des sols, il existe le risque d'une forte pollution en cas d'apport de charbon végétal issu d'une pyrolyse réalisée dans des conditions non contrôlées [67].

2.3 Mise en circulation de charbon végétal comme engrais

Dans son avis de droit, Hans Maurer ne classe pas le charbon végétal dans la catégorie des substances étrangères [54]. À l'heure actuelle, il est possible de mettre en circulation sur le marché suisse du charbon végétal en tant qu'engrais sous réserve d'une autorisation de l'OFAG et pour autant que la seule matière première utilisée soit du bois à l'état naturel et que d'autres conditions figurant dans la fiche « Exigences et prescriptions pour l'homologation d'un charbon végétal comme engrais (Biochar) » soient remplies [21]. Il y a lieu notamment de garantir un contrôle de qualité continu concernant la production, les valeurs limites d'émission et les teneurs en polluants, conformément au certificat EBC classe I ou II [65] et à l'ORRChim [12]. La fiche technique est disponible auprès de l'autorité d'homologation pour les engrais, à l'adresse duenger@blw.admin.ch. Les contrôles portant sur le charbon végétal fabriqué se limitent aux produits commerciaux mis en circulation comme engrais. Une ordonnance sur les engrais adaptée au règlement européen 2019/1009 sur les fertilisants [13] entrera en vigueur en 2024. Dans ce cadre, il est prévu d'élargir la liste des matières premières autorisées pour la production de charbon végétal, dans le respect des exigences de qualité actuelles, et de définir une quantité maximale d'épandage.

² En métal, les fours à pyrolyse Kon-Tiki permettent de produire du charbon végétal relativement facilement. Ils peuvent se prêter à la production de charbon répondant aux critères EBC [32].

3 Le point sur le charbon végétal dans les sols utilisés par l'agriculture

3.1 Impacts sur les sols

3.1.1 Rendement agricole

Jusqu'à présent, il n'a pas été possible de démontrer sur les sols agricoles suisses que l'épandage de charbon végétal apporterait une quelconque amélioration de rendement [44] [60]. Cela s'explique avant tout par le fait que le territoire helvétique se caractérise par des sols relativement jeunes situés dans une zone au climat tempéré et par les pratiques agricoles qui en découlent. A l'inverse, une amélioration de rendement a été constatée dans des sols tropicaux très évolués qui ont perdu leur fertilité au cours du temps [39]. Une amélioration du rendement a également été constatée lors d'apport de charbon végétal dans des sols peu fertiles, acides et sableux dans un climat tempéré [40] [74]. De manière générale, on ne peut pas s'attendre à observer un effet de type « Terra Preta »³ en Suisse [44].

3.1.2 Matière organique du sol

L'épandage de charbon végétal peut avoir une influence sur la matière organique du sol. Si l'on constate un changement dans le taux de décomposition de la matière organique du sol par suite d'un ajout d'amendements organiques, on parle d'un effet d'activation (« priming effect ») [67]. Un tel effet peut mener à une décomposition plus rapide, ou plus lente de la matière organique du sol. On en sait pour l'instant très peu sur cette polarité : les deux cas ont pu être observés sur de courtes durées. Une étude de modélisation [72] simulant des apports répétés de charbon végétal laisse penser qu'une décomposition plus rapide les premières années (priming positif) fait place, les décennies suivantes, à une décomposition plus lente (priming négatif). Ainsi, après 50 à 100 ans dans des conditions constantes, la formation de matière organique du sol prédomine. Si l'on considère la teneur en carbone, on constate que la décomposition potentiellement plus rapide de la matière organique du sol est très largement compensée par le carbone pyrolytique additionnel après une courte période.

3.1.3 Propriétés physiques du sol

Le charbon végétal peut influencer sur les propriétés physiques du sol [67]. Il n'existe pour l'instant que peu d'études systématiques en Suisse réalisées dans des conditions comparables. Cependant, les modifications induites, comme une augmentation de la porosité et de la rétention de l'eau ou une stabilité accrue des agrégats, sont la plupart du temps présentées comme des avantages [60]. Le charbon végétal favoriserait ainsi la rétention de l'eau durant les phases de sécheresse et contribuerait à prévenir les risques d'érosion lors de fortes précipitations. Dans le contexte climatique actuel, avec une augmentation des périodes de sécheresse d'une part et d'épisodes de fortes de précipitations d'autre part, le charbon végétal se profile ainsi comme une opportunité d'améliorer l'adaptation aux changements climatiques. La littérature spécialisée décrit en particulier un effet positif du charbon végétal sur la teneur en eau des sols dans le cas des sols sableux, ce qui ouvre la porte à des substrats techniques (sols techniques ou technosols) en dehors de l'agriculture, par exemple pour l'entretien d'arbres en milieu urbain [62].

3.1.4 Bilan de nutriments

L'apport de charbon végétal influe sur le bilan nutritif [39] [40] [44] [60] [67] [74]. À l'heure actuelle, la Suisse manque d'études systématiques qui permettraient d'établir des recommandations. Étant donné sa porosité et sa surface spécifique élevée, le charbon végétal permet un meilleur échange des nutriments. De plus, il pourrait améliorer l'enracinement et l'absorption des nutriments par les plantes en accroissant la capacité de rétention d'eau et en diminuant la compacité. Le charbon végétal serait aussi en mesure de relever le niveau de pH des sols [67]. Il peut également réduire le lessivage des nutriments et donc avoir un effet bénéfique sur les plantes ainsi que sur les eaux [29] [67]. Cependant, certaines observations de terrain ont montré un effet à court terme uniquement.

³ La « Terra Preta » (terre noire en portugais) est un type de sol fertile anthropique contenant du charbon végétal qui s'est formé à travers les siècles dans le bassin amazonien.

3.1.5 Risques posés par les polluants et les produits phytosanitaires

Aux effets potentiellement bénéfiques du charbon végétal s'oppose le risque d'un apport en polluants sur de grandes surfaces et d'une accumulation de polluants organiques et de métaux lourds au fil du temps [67]. Comme des substances présentant un risque pour la santé peuvent se concentrer le long de la chaîne alimentaire, ce sont à la fois les plantes, les animaux et l'être humain qui sont concernés. Il convient de prendre toutes les mesures nécessaires pour minimiser ce risque, en suivant les bonnes pratiques décrites au chapitre 2. On notera par ailleurs que le charbon végétal peut retenir d'autres substances comme les produits phytosanitaires [67].

Les avis divergent quant à l'association du charbon végétal et de produits phytosanitaires [45] [66] [67] : d'un côté, le charbon végétal peut réduire la disponibilité des produits phytosanitaires, c'est-à-dire restreindre l'absorption non souhaitée de ces produits par les organismes du sol et les plantes ; d'un autre côté, une telle association diminue les effets souhaités des produits phytosanitaires agissant sur les sols, ce qui peut parfois avoir pour conséquence qu'il est nécessaire d'utiliser de plus grandes quantités de produits phytosanitaires sur les sols. Sachant qu'en présence de charbon végétal, certains produits phytosanitaires peuvent se décomposer plus lentement, il peut globalement se produire une accumulation non souhaitable de ces substances dans les sols.

3.1.6 Biologie des sols

De manière générale, les connaissances actuelles sur la biologie des sols sont lacunaires. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne l'influence du charbon végétal sur les paramètres biologiques [50] [67], comme par exemple la composition des communautés microbiennes du sol et leurs prestations [71]. Les organismes du sol sont déterminants pour la majeure partie des fonctions remplies par les sols. Afin d'éviter toute conséquence négative, il est essentiel de procéder à une évaluation aussi complète que possible des conséquences écologiques de l'ajout de charbon végétal. Différents résultats ont été décrits en matière d'effets sur les organismes du sol [30] [34] [52] [70]. Par exemple, on a pu observer, sous l'influence de charbon végétal, une augmentation de la biomasse des organismes du sol, en particulier pour les organismes microbiens. Des effets négatifs ont été constatés chez des espèces de plus grande taille telles que les vers de terre, lorsque de très grandes quantités sont épandues (épandage unique, de l'ordre de ≥ 10 t/ha) [30]. Les effets sur les vers de terre constituent un point particulièrement délicat étant donné que ceux-ci jouent un rôle prépondérant dans la décomposition des matières organiques, dans le cycle des nutriments et dans la pédogenèse.

3.2 Conséquences sur le climat

L'épandage de charbon végétal a aussi une influence sur le bilan des gaz à effet de serre – le principal facteur du changement climatique [27] [46] [51]. Les plantes absorbent du CO₂ présent dans l'atmosphère et incorporent le carbone dans leur biomasse (photosynthèse). Étant donné la teneur relativement élevée en carbone et la faible vitesse de décomposition du charbon végétal produit à partir de biomasse, celui-ci recèle un certain potentiel pour stocker le carbone à long terme. Par exemple, le charbon végétal apporté aux sols⁴ peut générer ce qu'on appelle des « émissions négatives » (voir le rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.4211 [61]). Le taux de décomposition du charbon végétal dans les sols dépend des propriétés de ce charbon. Ce taux est difficile à estimer, mais on suppose qu'il s'élève à moins de 0,3 % par an. Il n'existe toutefois aucune étude à long terme en plein air représentative des conditions de l'agriculture en Suisse [60] [67]. Une faible proportion du charbon végétal se décompose rapidement tandis que la majeure partie reste stable dans le sol au fil du temps. Actuellement, on peut supposer que la fraction stable de charbon végétal dans les sols suisses persisterait pendant des décennies, voire des siècles, donc pendant un intervalle de temps de grande importance pour l'atténuation des changements climatiques au XXI^e siècle.

Un autre effet positif pour le climat serait la réduction des émissions de protoxyde d'azote sur les sols enrichis en charbon végétal. Une méta-analyse [29] a calculé que la réduction de N₂O serait dans un premier temps de l'ordre de 38 %, mais elle a aussi montré que l'effet est négligeable après une période d'un an et qu'il n'est pas statistiquement significatif. Pour ce qui est du méthane, les réductions des émissions concernent avant tout les sols (régulièrement) inondés. Les sols non inondés, qui

⁴ Le charbon végétal pourrait être utilisé non seulement dans l'agriculture, mais aussi comme matériau d'isolation pour les bâtiments ou comme composant de substrats techniques. Les cavernes, les grottes et les bunkers sont également envisageables comme sites de stockage artificiels. Par comparaison avec un épandage à large échelle et irréversible dans l'agriculture, l'avantage de ces dernières solutions résiderait dans les interactions limitées avec le cadre environnant ainsi que dans la possibilité d'un stockage sous forme concentrée si l'emplacement du site est connu de manière précise et que le processus peut être documenté.

représentent un puits naturel pour le CH₄ atmosphérique, semblent remplir cette fonction dans une moindre mesure sous l'influence du charbon végétal [42].

3.3 Conséquences incertaines

S'agissant des opportunités et des risques décrits dans le présent document, des études à long terme font défaut, en particulier pour les conditions représentatives de la Suisse et à large échelle sur le terrain. Seules de nouvelles études pourraient montrer les effets du charbon végétal au cours du temps et la façon dont celui-ci pourrait modifier les propriétés globales des sols. Bien que les sols contiennent naturellement du carbone pyrogène [57], certains effets des apports de charbon végétal restent indéterminés. On soulignera en particulier les conséquences contradictoires en matière de biologie des sols déjà mentionnées ci-avant, qui appellent à des recherches complémentaires sur le sujet. Il y a lieu de veiller à ce que l'apport de charbon végétal réalisé à des fins de protection du climat n'ait pas de répercussions négatives sur les sols.

Par ailleurs, la quantité limitée des résidus organiques (biomasse) peut engendrer une concurrence. La production de charbon végétal devrait ainsi s'aligner, dans toute la mesure du possible, sur la Stratégie de la Suisse en matière de biomasse [18]. Des études ont montré que les propriétés du charbon végétal dépendent des matières premières employées et des conditions de pyrolyse [67]. Bien qu'il n'existe encore aucune vue d'ensemble de ces interdépendances, des conflits d'objectifs peuvent survenir entre les priorités climatiques et les avantages agronomiques. Cela s'explique par le fait que le procédé de pyrolyse peut être optimisé selon deux points de vue : celui du rendement énergétique ou celui du rendement de charbon végétal. Ainsi, différents types de charbon végétal présenteront des propriétés différentes quant à leur capacité à stocker le carbone (permanence) et à leur potentiel à fixer les nutriments (et les polluants) [23] [33] [43] [58] [66].

Une étude a permis de montrer une augmentation de la croissance des plantes à la suite d'un épandage de charbon végétal, mais elle a souligné en parallèle que ces plantes présentaient une capacité de protection moindre contre les attaques d'insectes et de pathogènes ou contre des facteurs de stress comme la sécheresse [69].

Une modification déterminante de l'albédo⁵ des sols et, partant, de leur bilan thermique paraît moins probable, en particulier lorsque seules de petites quantités de charbon végétal sont épandues, car l'agriculture devrait viser de toute façon une couverture permanente des sols [38] [55].

Etant donné le peu de données disponibles et le manque d'expérience, le principe de précaution appelle à une anticipation ainsi qu'à une exclusion des évolutions négatives éventuelles.

3.4 Potentiel de stockage du carbone et viabilité financière

Conformément aux prescriptions (voir chapitre 2), l'utilisation de charbon végétal ne présente un intérêt que sur des sols agricoles ou urbains. Pour les surfaces où les engrais sont autorisés (champs, pâturages, alpages, cultures fruitières et maraîchères, vignes) et en partant du principe que seul le bois peut être utilisé comme matière première, Schmidt et al. (2021) ont estimé pour la Suisse que le charbon végétal renferme un potentiel de stockage de carbone de l'ordre de 0,90 à 1,16 Mt CO₂ par an [31] [60] [64]. Ces chercheurs estiment que cette quantité (350'000 tonnes de charbon végétal), considérée comme un potentiel durable et exploitable selon Thees et al. (2017) [64], serait effectivement disponible aujourd'hui. Toutefois, le potentiel de stockage du carbone est limité dans le temps en raison des processus de dégradation du charbon végétal (voir chapitre 3.2).

Keel et al. [48] ont effectué des calculs pour différents scénarios pour la Suisse. Dans un scénario comprenant uniquement des terres arables et qui emploie exclusivement de la biomasse issue de l'entretien du paysage, ils estiment le potentiel à 0,14 Mt CO₂ par an. Dans un autre scénario incluant en sus du bois-énergie de faible qualité, des déchets verts des ménages et des déchets de bois à l'état naturel, leur estimation augmente à 0,73 Mt CO₂ par an⁶.

Pour piéger 1 t de CO₂ dans les sols par l'intermédiaire du charbon végétal, il faut environ 0,4 t de charbon végétal certifié EBC. Sachant qu'actuellement, la volonté de payer pour les émissions

⁵ L'albédo est une grandeur décrivant le pouvoir réfléchissant des surfaces qui n'émettent pas elles-mêmes de lumière, mais renvoient les flux de lumière qu'elles interceptent dans toutes les directions.

⁶ Une autre solution consisterait à utiliser une partie de la biomasse d'une autre manière, c'est-à-dire dans un domaine autre que l'agriculture. Keel et al. (2021) [47] sont parvenus aux estimations suivantes : 0,21 Mt CO₂ par an pour des sols techniques en zones habitées (arbres en milieu urbain) ; 0,24 Mt CO₂ par an pour des routes nouvellement construites.

négligables est limitée (env. 100 à 200 francs par tonne de CO₂)⁷ et que les coûts de production sont élevés (env. 300 à 750 francs par tonne de charbon végétal) [56], le stockage de carbone dans les sols par l'intermédiaire du charbon végétal n'est aujourd'hui pas rentable sur le plan économique. Sur le marché, le charbon végétal se négocie aujourd'hui à quelque 1000 francs par tonne. Même si les agriculteurs tablaient sur une baisse des prix à long terme pour arriver à quelque 500 francs par tonne, les coûts liés à l'épandage sur les terres arables ne seraient pas suffisamment couverts tant que la vente de certificats constitue l'unique source de revenus de cette opération et que la volonté de payer pour le stockage du CO₂ n'augmente pas considérablement.

Les installations de pyrolyse peuvent être rentables si l'on combine les revenus issus du charbon végétal et ceux liés à la production de chaleur, éventuellement à la production d'électricité ainsi qu'aux certificats obtenus pour l'effet climatique. L'énergie thermique peut être utilisée notamment pour la chaleur à distance, comme dans diverses installations par exemple à Bâle, Flaach ou Frauenfeld [26] [28] [41].

Il est important de se demander si la production et l'utilisation de charbon végétal sont pertinentes sur le plan écologique en tenant compte de l'ensemble du cycle de l'énergie et des matériaux [51] [53] [73]. La possibilité d'employer les résidus organiques pour la production de charbon végétal pourrait entraîner ou aggraver des conflits d'utilisation. La mise en place de subventions pour le charbon végétal pourrait conduire à des changements d'affectation des terres si la biomasse est cultivée en vue de produire du charbon végétal plutôt que des denrées alimentaires. Une telle pratique est à éviter, car elle va à l'encontre de la Stratégie de la Suisse en matière de biomasse.

Une autre source de préoccupation est le fait que certains flux de matières organiques pourraient être détournés, par exemple si de la paille était prélevée sur une surface pendant une longue durée pour produire du charbon végétal, sans être compensée par un apport d'autres matières organiques. L'enrichissement en carbone via le charbon végétal sur une surface se traduirait ainsi par un appauvrissement en carbone sur une autre surface.

Pour calculer les émissions négatives, qui ont un effet sur le climat, il est essentiel de tenir compte du bilan global (extractions de CO₂ de l'atmosphère par rapport aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère). Il s'agit de prendre en compte, entre autres, les émissions produites à partir de la formation de la biomasse jusqu'à la transformation en charbon végétal (qui ne sera pas utilisé comme combustible), y compris les émissions induites par le transport et la pyrolyse. Finalement, les pertes dans l'atmosphère de la fraction labile du charbon végétal présent dans les sols doivent aussi être incluses dans le bilan [63] [65]. Toutes les émissions doivent être déduites du potentiel de stockage. Pour pouvoir déterminer correctement l'effet du charbon végétal sur le climat, les limites du système doivent être clairement définies et prises en compte.

Il vaut également la peine de comparer le potentiel de stockage du carbone par le charbon végétal qui équivaut aux émissions annuelles des sols organiques drainés en Suisse (environ 0,69 Mt de CO₂ en 2019) [37], alors que ces dernières représentent environ 3 % des surfaces agricoles uniquement. La remise en eau de sols organiques utilisés pour l'agriculture peut (moyennant des pertes de récoltes cependant) contribuer de manière considérable à la protection du climat, car les émissions issues de la minéralisation de la tourbe seraient réduites, voire stoppées et le carbone restant serait conservé.

3.5 Besoins de recherche

Les réflexions exposées ci-avant montrent clairement le besoin de mener des recherches complémentaires sur l'utilisation du charbon végétal. D'une part, il est nécessaire de réaliser des essais de terrain à long terme ; ces essais doivent se dérouler dans des conditions réalisables en pratique, habituelles et représentatives du milieu. Elles doivent inclure de manière aussi exhaustive que possible la globalité du système comprenant le sol, le climat ainsi que les bilans en énergie, en carbone et en nutriments. C'est pourquoi l'OFEV et l'OFAG soutiennent de premières études à long terme portant sur le charbon végétal (p. ex. « Black goes Green ») [35] [36]. D'autre part, ces essais de terrain doivent être complétés par des écobilans cohérents [43] [53] [73]. Ce n'est que lorsque ces résultats seront mis en commun, puis comparés à d'autres flux de matières et à des utilisations en cascade qu'il deviendra possible de déterminer quels sont les systèmes d'utilisation souhaitables. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une solution ne peut être mise en œuvre uniquement si elle permet d'exclure tout apport et toute accumulation de polluants.

⁷ La propension maximale à payer pour un projet de compensation (sanction selon l'art. 28 de la loi sur le CO₂ et attestations étrangères) est estimée à 200 francs par tonne de CO₂ [3] [11].

4 Conclusions et recommandations d'application pour l'utilisation de charbon végétal dans l'agriculture

Du point de vue, notamment, de la protection du sol, le charbon végétal ne peut être employé dans l'agriculture que si les paramètres pédologiques pertinents sont connus pour la surface concernée et qu'on a pu démontrer un besoin en matière de disponibilité des nutriments ou de la teneur en eau. Le cas échéant, le charbon végétal utilisé doit respecter les exigences présentées au chapitre 2 et ne doit être répandu qu'en petites quantités. Seuls des résidus à l'état naturel (p. ex. déchets ligneux issus de l'élagage des arbres) devraient être pyrolysés et le charbon végétal devrait faire l'objet d'une valorisation en cascade : le charbon végétal de qualité suffisante peut d'abord être incorporé aux aliments pour bétail⁸ ou utilisé comme litière dans les étables [24] [25] [60]. Pour un effet direct et bénéfique sur l'apport en éléments nutritifs, le charbon végétal doit être « chargé » en nutriments avant d'être épandu. Pour ce faire, il peut être mélangé par exemple avec du compost, de l'engrais ou du lisier [67]. Les valeurs empiriques montrent que les quantités d'épandage devraient rester plutôt faibles (0,5 à 2 tonnes de charbon végétal par hectare (matière sèche)) et que le processus devrait être répété (annuellement) [60]. Le plus souvent, le charbon végétal est épandu en surface, mais il est également possible de l'appliquer sous forme concentrée dans la zone racinaire, sous les semis ou les plantations, par points ou par bandes [60]. Pour un taux de 1 tonne par hectare et par an, Schmidt et al. (2021) ont calculé par extrapolation qu'au maximum 30 tonnes de charbon végétal par hectare seraient conservées dans le sol d'ici à 2050 et estiment qu'il n'y aurait aucune conséquence négative sur la qualité du sol [60]. Cependant, aujourd'hui les connaissances sont insuffisantes pour une évaluation globale sur les effets à long terme.

Dans la perspective de l'atténuation des changements climatiques, il existe un fort intérêt pour stocker à long terme du CO₂ atmosphérique dans les sols via le charbon végétal. En vertu du principe de précaution, l'utilisation de charbon végétal, au moins dans les cas d'utilisation à grande échelle, devrait faire l'objet d'un suivi scientifique. Il y a lieu de documenter de façon transparente les données de rendement et les analyses des sols, en particulier en ce qui concerne la permanence du stockage du carbone et les conséquences de l'ajout de charbon végétal sur la biologie des sols.

Tant qu'il n'est pas possible d'exclure des effets nocifs, par exemple sur les organismes du sol, il est déconseillé, à titre préventif, d'utiliser du charbon végétal à large échelle sur les sols agricoles.

⁸ À condition que les critères de qualité de la classe I EBC soient respectés. Les rapports pratiques indiquent une amélioration du bien-être animal si l'apport n'est pas permanent.

5 Bibliographie

5.1 Actes législatifs (lois et ordonnances)

- [1] **Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage (LPN ; RS 451)** du 1^{er} juillet 1966 (état le 1^{er} janvier 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [2] **Loi fédérale sur l'agriculture (Loi sur l'agriculture, LAgr ; RS 910.1)** du 29 avril 1998 (état le 1^{er} janvier 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/3033_3033_3033/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [3] **Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ (Loi sur le CO₂ ; RS 641.71)** du 23 décembre 2011 (état le 1^{er} janvier 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/855/fr> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [4] **Loi fédérale sur la protection de l'environnement (Loi sur la protection de l'environnement, LPE ; RS 814.01)** du 7 octobre 1983 (état le 1^{er} janvier 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [5] **Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux ; RS 814.20)** du 24 janvier 1991 (état le 1^{er} janvier 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [6] **Loi sur l'énergie (LEne ; RS 730.0)** du 30 septembre 2016 (état le 1^{er} octobre 2022), Assemblée fédérale de la Confédération suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/fr> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [7] **Ordonnance sur la protection de l'air (OPair ; RS 814.318.142.1)** du 16 décembre 1985 (état le 1^{er} octobre 2022), Conseil fédéral suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [8] **Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol ; RS 814.12)** du 1^{er} juillet 1998 (état le 12 avril 2016), Conseil fédéral suisse. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [9] **Ordonnance sur la mise en circulation des engrais (Ordonnance sur les engrais, OEng ; RS 916.171)** du 10 janvier 2001 (état le 16 juillet 2022), Conseil fédéral suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2001/105/fr> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [10] **Ordonnance sur la production et la mise en circulation des aliments pour animaux (Ordonnance sur les aliments pour animaux, OSALA ; RS 916.307)** du 26 octobre 2011 (état le 1^{er} janvier 2022), Conseil fédéral suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2011/772/fr> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [11] **Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ (Ordonnance sur le CO₂ ; RS 641.71)** du 30 novembre 2012 (état le 1^{er} janvier 2023), Conseil fédéral suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/fr> (dernier accès : 18 janvier 2023)
- [12] **Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim ; RS 814.81)** du 18 mai 2005 (état le 1 décembre 2022), Conseil fédéral suisse. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/fr> (dernier accès : 14 décembre 2022)
- [13] **Règlement (UE) 2019/1009** du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) n° 1069/2009 et (CE) n° 1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) n° 2003/2003 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009> (dernier accès : 14 novembre 2022)

5.2 Plans sectoriels et aides à l'exécution

- [14] **OFEV 2017** : Stratégie Biodiversité Suisse et plan d'action. Conseil fédéral suisse (éd.) : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/biodiversite/publications/publications-biodiversite/strategie-biodiversite-suisse.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [15] **OFEV 2018** : La politique climatique suisse. Mise en œuvre de l'Accord de Paris. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Info Environnement n° 1803 : 28 p. <https://www.bafu.admin.ch/ui-1803-f> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [16] **OFEV 2021** : Politique de la ressource bois 2030. Stratégie, objectifs et plan d'action bois 2021–2026. Info Environnement n° 2103 : 76 p. <https://www.bafu.admin.ch/ui-2103-f> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [17] **OFEV 2022** : Page web « Compensation des émissions de CO₂ ». <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/mesures-reduction/compensation.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [18] **OFEV et OFAG 2009** : Stratégie de la Suisse en matière de biomasse – Stratégie relative à la production, la transformation et l'utilisation de biomasse en Suisse, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Office fédéral du développement territorial (ARE), Office fédéral de l'environnement (OFEV), éd. : OFEV et OFAG, 23 mars 2009, <https://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/15397.pdf> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [19] **OFEV et OFAG 2012** : Éléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. L'environnement pratique n° 1225 : 62 p. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/elements-fertilisants-utilisation-engrais-agriculture.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)

- [20] **OFEN 2021** : Politique énergétique, page web du 22 septembre 2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politique/politique-energetique.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [21] **OFAG 2020** : Exigences et prescriptions pour l'homologation d'un charbon végétal comme engrais (Biochar), 15 juin 2020, Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Suisse. www.ofag.admin.ch. Adresse de contact : duenger@blw.admin.ch
- [22] **Conseil fédéral suisse 2020** : Stratégie Sol Suisse – Pour une gestion durable des sols, Info Environnement, 64 p. <https://www.bafu.admin.ch/ui-2018-f> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- ### 5.3 Littérature spécialisée
- [23] **Al-Wabel, M. I. et al. 2017** : Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation & Development*, Volume 29, Issue 7, Special Issue : Ash and fire, char and biochar in the environment. DOI : <https://doi.org/10.1002/ldr.2829>
- [24] **Abächerli, F. 2021** : Charbon végétal : une solution pour la protection du climat par l'agriculture ? Présentation au congrès 2021 AgroCleanTech 2021 sur le thème « Réduire les gaz à effet de serre dans l'agriculture ». https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Verora_Fredy_Abaecherli_F.pdf (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [25] **Association AgroCleanTech 2017** : Pflanzenkohleeinsatz in der Landwirtschaft. Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohle als Klimamassnahme. Juillet 2016. Florence Looser, association AgroCleanTech. https://agrocleantech.ch/images/Fachleute/Wissen/Pflanzenkohleeinsatz_in_der_Landwirtschaft_als_Klimamassnahme.pdf (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [26] **AgroCO2ncept Flaachtal** : Des agriculteurs et des entrepreneurs de la région du Flaachtal ont pris l'initiative de démontrer la faisabilité des mesures pratiques de protection du climat dans les travaux agricoles et dans la région. <http://www.agroco2ncept.ch/das-projekt/index.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [27] **Amelung, W. et al. 2020** : Towards a global-scale soil climate mitigation strategy, *Nature Communications* 11, Article number 5427. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- [28] **Bioenergie Frauenfeld** : Des résidus de bois de la région sont transformés par pyrolyse en charbon végétal dans une centrale thermique à bois. <https://www.bioenergie-frauenfeld.ch/> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [29] **Borchard, N. et al. 2019** : Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 651, Part 2, Pages 2354–2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- [30] **Briones, M. J. I., Panzacchi, P., Davies, C. A., Ineson, P. 2020** : Contrasting responses of macro- and meso-fauna to biochar additions in a bioenergy cropping system, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 145. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107803>
- [31] **Burg, V., Bowman, G., Erni, M., Lemm, R., Thees, O. 2018** : Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass and Bioenergy*, Volume 111, Pages 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.007>
- [32] **Cornelissen, G., Pandit, N.R., Taylor, P., Pandit, B.H., Sparrevik, M., Schmidt, H.P., 2016**: Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. *PLoS ONE* 11(5): e0154617. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- [33] **Crombie, K., Mašek, O., Cross, A., Sohi, S. 2015** : Biochar – synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. *GCB Bioenergy*, Volume 7, Issue 5, Pages 1161–1175. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12213>
- [34] **Elliston, T. et Oliver, I. 2020** : Ecotoxicological assessments of biochar additions to soil employing earthworm species *Eisenia fetida* and *Lumbricus terrestris*. *Environmental Science and Pollution Research* 27, Pages 33410–33418. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04542-2>
- [35] **FiBL 2021a** : Kohle fürs Klima (communiqué de presse, en allemand). FiBL Suisse et Grün Stadt Zürich entament leur essai pratique de longue durée nommé « Black goes Green », qui s'intéresse à l'influence des charbons végétaux utilisés dans l'agriculture. Les thèmes traités sont la protection du climat et la teneur en eau des sols. <https://www.fibl.org/de/infothek/meldung/kohle-fuers-klima> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [36] **FiBL 2021b** : Klimawirkung von Recyclingdüngern und Pflanzenkohle: Emissionen von Lachgas, Methan und Ammoniak in einem Feldversuch. <https://www.fibl.org/de/themen/projekt Datenbank/projektitem/project/1473> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [37] **FOEN 2021** : Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2021 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern. <http://www.climate reporting.ch>
- [38] **Genesio, L. et al. 2012** : Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environmental Research Letters* 7 (2012) 014025 (8 pages). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/1/014025> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [39] **Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. 2001** : The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88 (1), Pages 37–41. <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- [40] **Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H. P., Gerber, H. 2015** : Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers, *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 667–678. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4>

- [41] **IWB 2021** : Pflanzenkohleanlage - Produktion CO₂-negativer Fernwärme und Pflanzenkohle, Industrielle Werke Basel. <https://www.iwb.ch/Ueber-uns/Projekte/Innovationsprojekte/Pflanzenkohleanlage.html> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [42] **Jeffery, S., Verheijen, F., Kammann, C., Abalos, D. 2016** : Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 101, Pages 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.021>
- [43] **Jeffery, S. et al. 2015** : The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins, *GCB Bioenergy*, Volume 7, Issue 1, Pages 1–13. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>
- [44] **Jeffery, S. et al. 2017** : Biochar boosts tropical but not temperate crop yields, *Environmental Research Letters*, Volume 12, Number 5. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- [45] **Khorram, M. S. et al. 2016** : Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 44, Pages 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
- [46] **Keel, S. 2021** : Les sols agricoles en tant que puits de carbone. Présentation au congrès 2021 AgroCleanTech 2021 sur le thème « Réduire les gaz à effet de serre dans l'agriculture ». https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Agroscope_Sonja_Keel_F.pdf (dernier accès : 17 janvier 2022)
- [47] **Keel, S. G., Johannes, A., Boivin, P., Burgos, S., Charles, R., Hagedorn, F., Kulli, B., Leifeld, J., Saluz, A., Zimmermann, S. 2021** : Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639). Report by Agroscope. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.
- [48] **Keel, S. G., Bretscher, D., Leifeld, J., Ow, A., Wüst-Galley, C.** (manuscrit soumis à PNAS) : Soil carbon sequestration potential bounded by population growth, land availability, food production, and climate change.
- [49] **Lehmann, J., Czimczik, Cl., Laird, D., Sohi, S. 2009** : Stability of Biochar in the Soil. In : J. Lehmann & J. Stephen (dir.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, Londres, Pages 169–182.
- [50] **Lehmann, J. et al. 2011** : Biochar effects on soil biota – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 43, Issue 9, Pages 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- [51] **Lehmann, J. et al. 2021** : Biochar in climate change mitigation, *Nature Geoscience* 14, Pages 883–892. <https://doi.org/10.1038/S41561-021-00852-8>
- [52] **Liesch, A. M. et al. 2010** : Impact of Two Different Biochars on Earthworm Growth and Survival, *Annals of Environmental Science*, Volume 4, Pages 1–9. <http://hdl.handle.net/2047/d20000234>
- [53] **Matuščík, J., Hnátková, T., Kočí, V. 2020** : Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- [54] **Maurer & Stäger AG 2021** : Rechtlicher Umgang mit Pflanzenkohle, avis de droit rédigé sur mandat de l'OFEV, 15 février 2021, par Hans Maurer, docteur en droit, avocat et chimiste diplômé
- [55] **Meyer, S., Bright, R. M., Fischer, D., Schulz, H., Glaser, B. 2012** : Albedo Impact on the Suitability of Biochar Systems To Mitigate Global Warming, *Environmental Science & Technology*, 46, 22, Pages 12726–12734. <https://doi.org/10.1021/es302302g>
- [56] **Prognos et Infras 2021** : Energieperspektiven 2050+, Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz. 7 septembre 2021, révision le 19 novembre 2021, étude réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie OFEN. <https://t1p.de/EP2050NET> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [57] **Reisser, M., Purves, R. S., Schmidt, M. W. I., Abiven, S. 2016** : Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. *Front. Earth Sci., Sec. Biogeoscience*. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00080>
- [58] **Rodrigues, L., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Keel, S. G., Mondini, C., Plaza, C. et Leifeld, J.** (manuscrit soumis à la revue *Environmental Science & Technology*) : The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice.
- [59] **Schimmelpfennig, S. et Glaser, B. 2012** : One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars, *J. Environ. Qual.*, Volume 41, Issue 4, Pages 1001–1013. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>
- [60] **Schmidt, H. P., Hagemann, N., Abächerli, F., Leifeld, J. et Bucheli, T. 2021** : Pflanzenkohle in der Landwirtschaft - Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science* 112, 2021, Pages 1–71. <https://doi.org/10.34776/as112g>
- [61] **Conseil fédéral suisse 2020** : Quelle pourrait être l'importance des émissions négatives de CO₂ pour les futures politiques climatiques de la Suisse ? Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 18.4211 Thorens Goumaz du 12 décembre 2018. Berne, le 2 septembre 2020. <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2018/20184211/Bericht%20BR%20F.pdf> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [62] **Stockholm Biochar Project 2019** : Ce projet utilise des déchets issus des parcs et des jardins pour produire de l'énergie renouvelable et du charbon végétal en vue d'une utilisation dans les jardins, les parcs municipaux et les plates-bandes. <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Mattias-Gustafsson-pieni.pdf> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [63] **Tanzer et Ramirez 2019** : When are negative emissions negative emissions? *Energy and Environmental Science*, Issue 4. <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>

- [64] **Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., Lemm, R. 2017** : Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. Rapports du WSL, cahier 57. Birmensdorf : Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:13277> (dernier accès : 6 janvier 2022)
- [65] **The European Biochar Certificate (EBC) and Positive list of biomass feedstock**. Version 10.1 du 10 janvier 2022. <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-guidelines-documents-for-the-certification> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [66] **Thünen Institut 2022** : Résultats du projet « Pflanzenkohle in der Landwirtschaft 2010–2015, Einsatz von Kohlen aus der Pyrolyse und der hydrothermalen Carbonisierung in der Landwirtschaft ». Résumé sur la page web suivante : <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/pflanzenkohle-in-der-landwirtschaft> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [67] **UBA 2016** : Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, Texte 04/2016, Umweltbundesamt Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-risiken-des-einsatzes-von-biokohle-anderer> (dernier accès : 14 novembre 2022)
- [68] **Verenum 2020** – Nussbaumer, T., Lauber, A. et Zotter, P., 2020 : Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse, Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung, rapport rédigé sur mandat des cantons d'Argovie, des Grisons et de Berne, Verenum AG, Zurich, 14 septembre 2020. <https://t1p.de/verenum2020> (dernier accès : 14 décembre 2022)
- [69] **Viger, M., Hancock, R. D., Miglietta, F. et Taylor, G. 2015** : More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. *Bioenergy*, Volume 7, Issue 4, Pages 658–672. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12182>
- [70] **Wahlen, J. K., Benslim, H., Elmi, A. A. et Husk, B. R. 2021** : Earthworm populations are stable in temperate agricultural soils receiving wood-based biochar. *Pedosphere* 31(3), Pages 398–404. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60080-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60080-7)
- [71] **Wagg C., Bender F., Widmer F., van der Heijden M. 2014** : Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 14, Pages 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- [72] **Woolf, D. et Lehmann, J. 2012** : Modelling the long-term response to positive and negative priming of soil organic carbon by black carbon. *Biogeochemistry* (2012) 111, Pages 83-95. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9764-6>
- [73] **Woolf, D., Lehmann, J. et Lee, D. R. 2016** : Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. *Nature Communications* 7, 13160. <https://doi.org/10.1038/ncomms13160>
- [74] **Ye L. et al. 2020** : Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, Volume 36, Issue 1, Pages 2–18. <https://doi.org/10.1111/sum.12546>