

Chapitre 17

Séquestration du carbone dans le sol : une solution pour atténuer le changement climatique et s'y adapter ?

Julien Demenois, Damien Beillouin, David Berre, Vincent Blanford, Rémi Cardinael, Abigail Fallot, Frédéric Feder, Christophe Jourdan, Dominique Masse, Tom Wassenaar

Le sol est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, qui depuis le début de l'humanité nourrit les hommes. Aujourd'hui, 95 % des éléments nutritifs de notre alimentation en proviennent (FAO, 2022). Cependant, la capacité du sol à continuer de nourrir l'humanité est menacée par le changement climatique et elle est déjà altérée par divers types de dégradations : artificialisation, érosion, pollution, salinisation. La dégradation du sol et des formations végétales concerne au niveau mondial déjà 75 % des terres émergées et menace la subsistance de plus d'un milliard de personnes (Cherlet *et al.*, 2018). Cette dégradation inclut la perte de carbone organique du sol (COS), principal constituant des matières organiques du sol. Le COS assure de nombreuses fonctions environnementales et agricoles (fertilité, biodiversité, rétention de l'eau, etc.). De fait, le sol joue un rôle majeur dans le cycle du carbone et dans la régulation du climat.

Le stock de COS, hors pergélisol, est trois fois plus élevé que celui de l'atmosphère. Le sol est ainsi le plus grand réservoir de carbone terrestre : 2400 GtC entre 0 et 2 m de profondeur à l'échelle du globe. Ce stock se trouve majoritairement dans le sol des forêts (30 %) et des prairies (30 % à 35 %), et dans une moindre mesure dans le sol des terres cultivées (15 %) (Lal *et al.*, 2012), où il est néanmoins plus sujet à variations. À cela s'ajoute le carbone du pergélisol (plus de 1 600 Gt entre 0 et 3 m de profondeur). La fonte du pergélisol liée à l'augmentation moyenne de la température à la surface du globe (+ 1,48 °C par rapport à la période 1850-1900) libère de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES), sans commune mesure avec les quantités de carbone susceptibles d'être absorbées par la photosynthèse et par la croissance de la végétation, aggravant de fait le changement climatique.

Les changements d'usage des terres sont une autre source majeure d'émissions nettes de GES. Au cours des dernières décennies (1960-2020), près d'un tiers de la surface terrestre mondiale a subi un changement d'affectation du sol (Winkler *et al.*, 2021). La conversion d'écosystèmes naturels en terres agricoles a ainsi entraîné une perte cumulée de 116 GtC dans les deux premiers mètres du sol (Sanderman *et al.*, 2017). Outre la conversion d'écosystèmes, les activités humaines ont un impact profond sur le COS, réduisant sa contribution aux services écosystémiques (Ma *et al.*, 2023).

La teneur en COS peut néanmoins être modulée, permettant au sol de séquestrer du carbone, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique en inversant ces

tendances de dégradation et de perte de COS. La séquestration du carbone dans les sols est définie comme le « processus de transfert du carbone de l'atmosphère dans le sol par l'intermédiaire des plantes ou d'autres organismes, qui est retenu sous forme de carbone organique dans le sol, ce qui entraîne une augmentation du stock mondial de carbone dans le sol » (Olson *et al.*, 2014).

En matière de régulation du climat, le COS représenterait 9 % du potentiel d'atténuation des forêts, et 47 % de celui de l'agriculture et des prairies selon Bossio *et al.* (2020). Le maintien ou l'augmentation du stock de COS constitue l'une des rares options identifiées par le Giec (IPCC, 2019) permettant de contribuer simultanément à l'atténuation du changement climatique, à la lutte contre la dégradation des terres et à la perte de biodiversité, tout en améliorant la sécurité alimentaire. Ces synergies sont à l'origine du lancement de l'Initiative internationale « 4 pour 1000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » lors de la COP21 sur le climat en 2015.

Le stock de COS dépend de nombreux facteurs à différentes échelles, du climat aux propriétés physico-chimiques du sol, en passant par l'usage des terres et les pratiques de gestion (Wiesmeier *et al.*, 2019). L'usage des terres et les pratiques de gestion façonnent les entrées et les sorties de carbone à l'échelle de la parcelle ainsi que la qualité des entrées de carbone, et peuvent modifier le renouvellement du stock de COS (Fujisaki *et al.*, 2018). Ces pratiques de gestion et ces choix d'usage des terres sont dépendants de facteurs socio-économiques et politiques, que ce soient par exemple leurs coûts de mise en œuvre ou encore le niveau de compétences qu'elles requièrent, davantage que de facteurs techniques (Amundson et Biardeau, 2018). De fait, le territoire, défini comme un socio-écosystème, est l'échelle focale où les questions d'aménagement du sol et des terres peuvent être discutées et leurs conséquences évaluées sur la séquestration du carbone dans le sol (Demenois *et al.*, 2020).

Dans une première partie, ce chapitre présente les impacts du changement climatique, du changement d'usage des terres et des pratiques agricoles sur le COS et identifie les solutions techniques pour préserver ou pour stocker davantage de carbone dans le sol. Dans une deuxième partie, les approches territoriales sont discutées à travers l'exemple de l'Afrique de l'Ouest semi-aride et subhumide, permettant d'illustrer l'importance des dimensions socio-économiques et politiques. Enfin, un regard critique est porté sur la séquestration du carbone dans le sol à travers le prisme des risques de maladaptation au changement climatique.

1. L'impact des activités humaines sur le carbone organique du sol et ses implications pour la régulation du climat

L'usage des terres et les pratiques de gestion sont des leviers majeurs de la séquestration du COS. La préservation et la restauration du COS représentent à elles seules jusqu'à 25 % du potentiel de l'ensemble des solutions fondées sur la nature (SFN) pour lutter contre le changement climatique (Bossio *et al.*, 2020). Le premier levier réside donc dans la préservation des écosystèmes riches en carbone tels que les tourbières, les forêts anciennes, les zones humides et les mangroves, qui détiennent ensemble au moins 10 % du stock mondial de carbone du sol (260 Gt) (Noon *et al.*, 2022). Ce stock ne peut se reconstituer à l'échelle d'une génération, leur préservation est donc essentielle.

De récents travaux (Beillouin *et al.*, 2023) ont montré que les effets du changement d'utilisation des terres sur le COS étaient de sept à dix fois supérieurs par unité de surface aux effets directs du changement climatique (comme l'augmentation de température, du CO₂). Par exemple, la conversion des forêts, des prairies ou des zones humides en terres agricoles entraîne une perte de COS de l'ordre de 25 %, 16 % et 25 % en moyenne, respectivement. Ces pertes, combinées à la conversion de vastes zones en terres agricoles au cours des dernières décennies (environ 1 million de kilomètres carrés au cours des soixante dernières années), ont ainsi contribué de manière substantielle à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. La conversion des milieux naturels en terres cultivées a des conséquences à long terme, car le COS perdu mettra des décennies, voire davantage, à revenir à son niveau initial, si des pratiques permettant de reconstituer le stock sont à nouveau et durablement adoptées (Dignac *et al.*, 2017). Par exemple, en Amazonie française (Guyane française), dans des prairies issues de déforestation sans utilisation du feu, Stahl *et al.* (2017) ont mis en évidence que le stock de COS sous prairie gérée en pâturage tournant et avec des légumineuses retrouve son niveau d'avant déforestation après 24 ans et continue à augmenter, notamment en profondeur (inférieure à 1 m) (Stahl *et al.*, 2016). L'augmentation de COS dans ces systèmes herbagers atteint potentiellement un niveau élevé ($1,27 \pm 0,37$ tC/ha/an), essentiellement dans le COS (Blanfort *et al.*, 2022). La perte de carbone de la biomasse forestière du fait de la déforestation est en revanche définitive. Cependant, l'effet du changement d'utilisation des terres sur le COS n'a que rarement fait l'objet d'études systématiques, que ce soit en Afrique du Nord, en Afrique centrale, au Proche-Orient ou en Asie centrale.

La restauration du stock de COS dans les écosystèmes cultivés est un second levier important pour séquestrer le carbone dans le sol (Cook-Patton *et al.*, 2021). De nombreuses pratiques agricoles permettent d'accroître localement le COS, telles que l'ajout de matière organique exogène ou la production *in situ* de matière organique. L'origine de la matière organique, les effets par unité de surface de ces pratiques sur le carbone et les surfaces disponibles pour leur mise en œuvre vont déterminer la séquestration globale du carbone. Des travaux récents tentent de quantifier plus précisément ces effets et d'identifier les pratiques les plus prometteuses.

L'agroforesterie est identifiée comme une des options les plus efficaces par augmentation *in situ* de la matière organique : les arbres augmentent d'en moyenne 20 % (Beillouin *et al.*, 2023) à 25 % (Cardinael *et al.*, 2018a) le COS dans les terres arables par rapport à des systèmes sans arbres (encadré 17.1). La superficie mondiale agricole en agroforesterie est estimée à 1,6 milliard d'hectares, avec environ 78 % dans les régions tropicales et 22 % dans les régions tempérées (Nair *et al.*, 2021), avec un fort potentiel pour encore augmenter les surfaces (Zomer *et al.*, 2022). Ainsi, les estimations mondiales du potentiel d'atténuation de l'agroforesterie varient de 0,12 GtC/an à 0,31 GtC/an, la plaçant ainsi comme une des principales solutions fondées sur la nature pour lutter contre le changement climatique (Terasaki Hart *et al.*, 2023).

D'autres pratiques de diversification des cultures peuvent aussi permettre d'augmenter le COS. Ainsi, l'intégration de plantes de couverture, le maintien des résidus de culture dans les parcelles ou le recours à des rotations culturales permettent d'augmenter le COS de 11,6 %, 13 % et 6,5 % par hectare en moyenne (Beillouin *et al.*, 2023). Certains auteurs estiment que jusqu'à 50 % des 800 Mha de terres cultivées sont propices au recours à des plantes de couverture (Bossio *et al.*, 2020), résultant en une séquestration approximative possible de carbone de 0,11 GtC/an.

Les apports de carbone exogène permettent aussi de fortes augmentations locales des stocks de COS dans les terres cultivables et les prairies (Beillouin *et al.*, 2023). Cependant, l'intérêt des apports de carbone exogène dans l'atténuation du changement climatique peut être limité en fonction de la provenance de ces matières organiques (Don *et al.*, 2023) et de la faisabilité technicoéconomique de leur production. Beillouin *et al.* (2023) relèvent que le biochar¹ conduit à la plus forte augmentation observée par unité de surface, avec un gain moyen de COS de 67 % dans les terres cultivables et de 32 % dans les prairies. L'application de biochar a donc un potentiel d'atténuation du changement climatique fort (Lehman *et al.*, 2021), mais variable en fonction du taux d'application et des propriétés physico-chimiques des biochars.

Encadré 17.1. Deux exemples de systèmes agroforestiers

De nombreux types d'agroforesteries sont efficaces pour augmenter les stocks de COS : l'intégration d'arbres dans les terres agricoles entraîne une augmentation moyenne du COS de 33 % pour les systèmes multistratifiés, de 32 % pour les parcs arborés, de 21 % pour l'agroforesterie intraparcellaire, de 19 % pour les jachères améliorées (pratiquées en régions tropicales) et de 17 % pour les haies (Beillouin *et al.*, 2023). La plantation d'arbres dans les prairies (c'est-à-dire le sylvopastoralisme) entraîne également une augmentation significative du COS de 26 %. À noter que l'agroforesterie peut aussi stocker des quantités importantes de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine des arbres (Cardinael *et al.*, 2018a). L'agroforesterie existe et peut être mise en œuvre dans les pays du Nord (voir ci-dessous un exemple dans le sud de la France) et dans les pays du Sud (voir ci-dessous un exemple au Sénégal). Les pays évoquent ainsi régulièrement l'agroforesterie pour l'atténuation du changement climatique. Par exemple, 40 % des 147 pays hors annexe I du protocole de Kyoto proposent l'agroforesterie comme option d'atténuation des émissions de GES dans leurs contributions déterminées au niveau national (Rosenstock *et al.*, 2019).

Le système agroforestier de Restinclières dans le sud de la France

Le domaine de Restinclières abrite depuis 1995 l'un des sites expérimentaux en agroforesterie intraparcellaire parmi les plus anciens de France, associant du noyer hybride à du blé dur (figure 17.1). Une parcelle agricole adjacente sans arbre sert de référence. Sur ce site, une centaine de carottes de sol ont été prélevées jusqu'à 2 m de profondeur dans chaque parcelle pour quantifier les stocks de COS. Les entrées de carbone organique (CO) au sol, aériennes (chute des feuilles) et souterraines (racines fines des arbres et des cultures), ont aussi été quantifiées. Une augmentation du stock de COS de 6,3 tC/ha a été observée en agroforesterie au bout de dix-huit ans. Cela correspond à un taux de stockage de 248 ± 31 kgC/ha/an dans les trente premiers centimètres du sol, et de 350 ± 41 kgC/ha/an dans le premier mètre (Cardinael *et al.*, 2015), soit une augmentation de 7 %/an. À cela s'ajoute une accumulation de carbone dans la biomasse des arbres de 770 ± 110 kgC/ha/an (Cardinael *et al.*, 2017). Ce stockage additionnel de COS est expliqué par une augmentation des entrées de CO au sol d'environ 40 % par rapport à la parcelle agricole (Cardinael *et al.*, 2018b). La végétation herbacée se développant sur la ligne d'arbres joue un rôle important. Une forte hétérogénéité spatiale existe, le COS étant majoritairement

1. Biochar : matériau carboné produit à partir de biomasses et dont l'utilisation permet que le carbone qu'il contient constitue un « puits de carbone » à long terme selon l'European Biochar Council. Le biochar est fabriqué par pyrolyse de la biomasse à températures élevées (entre 350 °C et 1 000 °C) en l'absence d'oxygène.

Encadré 17.1. (suite)

stocké sur les lignes d'arbres. La majorité du carbone additionnel est sous la forme de matières organiques particulières labiles, et donc sensibles à tout changement futur d'usage des terres (Cardinael *et al.*, 2015).



Figure 17.1. Site expérimental de Restinclières en agroforesterie intraparcellaire associant du noyer hybride à du blé dur. Crédit : photo de R. Cardinael.

Le parc agroforestier à *Faidherbia* de Niakhar (Sénégal) : cas de l'impact des systèmes racinaires de *Faidherbia albida* dans le cycle du carbone

L'impact des systèmes agro-sylvopastoraux du Sahel sur le cycle du carbone et les flux de GES est très peu documenté. Les apports de litière souterraine sont cruciaux, mais on sait peu de choses sur la distribution, la productivité et la contribution du système racinaire aux apports de carbone dans le sol. Pour augmenter le stockage du carbone dans les sols cultivés, il apparaît nécessaire de mieux comprendre la dynamique du carbone, en particulier en profondeur, là où la décomposition de la litière racinaire semble plus lente que dans la couche arable. Dans un parc agro-sylvopastoral du bassin arachidier au Sénégal, dominé par *Faidherbia albida* en culture intercalaire avec du mil et de l'arachide en rotation interannuelle, la variabilité temporelle et spatiale des flux de GES ainsi que la dynamique de l'apport de carbone issu des racines dans le sol ont été suivies sur plusieurs années.

De manière inattendue, la biomasse racinaire des arbres était plus élevée à plus de trente mètres du tronc que sous l'arbre dans la couche de sol de 30 à 100 cm, ce qui suggère une influence à longue distance des *Faidherbia* (Siegwart *et al.*, 2023). Jusqu'à 150 cm de profondeur, la contribution de la litière racinaire des arbres aux stocks de carbone du sol représente 6,5% des apports totaux de carbone du sol. Dans ce type de parc en zone semi-aride avec de faibles stocks de carbone dans le sol, l'augmentation de la densité des arbres ou la sélection de cultures à enracinement profond devraient être favorisées pour atténuer les émissions de CO₂.

L'application de biochar permet de stocker du carbone à plus long terme que l'application directe de la biomasse dont il est issu. Cela est vrai même en tenant compte des émissions de GES qui se produisent lors de sa production et de sa manipulation. Cependant, la rareté de la biomasse dans certaines régions ou sa concurrence avec l'alimentation du bétail, en particulier dans les pays d'Afrique subsaharienne, ne rend pas forcément possible ou souhaitable la production à grande échelle de biochar. Il convient aussi de tenir compte des éventuels effets néfastes du biochar sur les propriétés du sol (comme la toxicité des substances présentes dans le biochar qui peuvent être générées au cours du processus de pyrolyse) et sur la biodiversité (Brtnicky *et al.*, 2021). Les amendements organiques appliqués dans les terres cultivables, autres que le biochar, permettent quant à eux un gain moyen de COS de 29 %, et de 34 % dans les prairies. À La Réunion, Edouard-Rambaut *et al.* (2022) ont mis en évidence qu'un apport d'amendement organique pendant quinze ans dans des prairies fauchées continue à induire une augmentation du COS, notamment dans les horizons profonds du sol.

De nombreuses pratiques telles que le travail du sol, les différents modes de pâturage, la fertilisation minérale peuvent aussi avoir des impacts non négligeables sur le COS. Les effets des différentes pratiques sont variables en fonction des conditions pédoclimatiques et des pratiques agricoles. Elles peuvent être combinées entre elles, et apportent souvent d'autres cobénéfices, comme une préservation de la biodiversité ou de rendement. Les pratiques des agriculteurs ne sont pas à raisonner individuellement, mais en prenant aussi en compte les différents compartiments de l'écosystème (animaux, sol, végétation) et les différentes échelles spatiales (parcelle, ferme, territoire). Ainsi, des études à l'échelle du paysage montrent que les paysages pastoraux au Sahel peuvent avoir un potentiel inattendu pour l'atténuation du changement climatique. Par exemple, le bilan carbone d'un territoire sylvopastoral du Ferlo Nord (au Sénégal) apparaît à l'équilibre lorsque le COS est pris en compte dans ce bilan (Assouma *et al.*, 2019), alors que ces terres d'élevage sont classiquement considérées comme des sources de GES.

2. En Afrique de l'Ouest semi-aride et subhumide, les approches territoriales pour penser l'usage de la biomasse et les flux de nutriments

Les systèmes agro-sylvopastoraux d'Afrique de l'Ouest sont définis par l'intégration de l'agriculture avec des activités d'élevage et par un rôle central des arbres que ce soit à travers les savanes arborées, les jachères ou les parcs agroforestiers. L'organisation spatiale des territoires, associant étroitement la zone cultivée et la zone non cultivée, engendre d'importants transferts de fertilité des sols et influence fortement le statut organique des sols et les stocks de carbone dans les sols ainsi que la durabilité des systèmes de production agricoles.

Le Cirad et ses partenaires mènent de nombreux projets dans la zone semi-aride et subhumide d'Afrique de l'Ouest², où la question de la séquestration de carbone dans le sol est liée au maintien de la fertilité de celui-ci, avant d'être une préoccupation d'atténuation des effets du changement climatique. Dans cette région où les rendements agricoles sont fortement limités par l'accès aux intrants, une mécanisation limitée, des sols peu fertiles et par la faible pluviosité (Giller *et al.*, 2021), la séquestration de

2. <https://www.fair-sahel.org/>, <https://www.cassecs.org/>, <https://ur-aida.cirad.fr/nos-recherches/projets-et-expertises/3f2>.

carbone est contrainte par la faible quantité de carbone stockée par la photosynthèse. Dans ce contexte, la valorisation des résidus de culture apparaît donc comme une nécessité pour recycler le carbone, et deux voies s'opposent historiquement : restituer au sol les résidus de culture ou les utiliser pour alimenter le bétail, ce dernier pouvant fournir de la fumure organique utile au maintien de la fertilité des sols (Naudin *et al.*, 2015).

Dans ces systèmes agro-sylvopastoraux, il est difficile d'enclencher un cercle vertueux de gestion de la biomasse par l'intégration agriculture-élevage à l'échelle de la ferme. Le manque de biomasse conduit les animaux à quitter la ferme pour aller chercher les résidus dans les champs voisins ou même dans des régions plus humides lors de grandes transhumances. Dans ce contexte d'expansion des surfaces cultivées et de présence de vaines pâtures dans des paysages ouverts, les résidus sont récoltés par les producteurs pour subvenir aux besoins fourragers de leurs troupeaux. Toutefois, Zoungrana *et al.* (2023) ont montré que jusqu'à 60 % de ces résidus étaient laissés au champ ou brûlés par manque de ressources (travail, matériel). Ces zones de production sont marquées par une présence importante de la culture du coton (synonyme d'accès aux intrants pour les producteurs), dont les résidus sont peu digestes et donc difficilement valorisables par les ruminants. Dans un contexte plus aride dans le nord du Burkina, Assogba *et al.* (2023) ont également démontré que les résidus de récolte stockés ne permettent pas de couvrir les besoins des animaux (énergie et protéine) durant la saison sèche.

C'est alors à l'échelle régionale qu'il convient de réfléchir à l'optimisation des flux de nutriments entre les systèmes de culture et les systèmes de production animale, en interaction avec les autres unités paysagères. Les zones pastorales communes constituent une source de biomasse cruciale pour l'équilibre des écosystèmes, dans des zones parfois difficilement cultivables, que les troupeaux valorisent en paissant et fertilisent en y déposant les fèces. Il faut noter toutefois que dans certains cas les bouses de vaches déposées dans ces zones de pâture sont aussi récoltées et rapportées dans les zones de cultures, mettant en péril la fertilité de ces zones sur le long terme (Sattari *et al.*, 2016). Ce transfert de fertilité entre les zones de pâtures et les zones cultivées doit donc nécessairement se faire en respectant les équilibres de nutriments de chaque partie, sans quoi il ne pourra durablement permettre de compenser la faible productivité des systèmes de culture de la région.

Les conflits autour de ces zones pastorales, ou leur simple disparition progressive au profit des cultures, ont mis en danger d'autres espaces tels que les forêts protégées dans le sud du Burkina Faso (Koumbia). En réponse aux contraintes d'accès à des ressources fourragères cultivées ou à des zones de pâtures, les éleveurs de cette région viennent dans la forêt faire paître leurs animaux illégalement. Orounladji *et al.* (2024) ont également démontré que les ressources communes (points d'eau, résidus de culture, zones de pâture) sont essentielles à la viabilité des systèmes agro-sylvopastoraux. L'analyse doit donc inclure les dimensions politique et territoriale.

Pour identifier les conditions de séquestration du carbone et préciser les pratiques correspondantes, il convient donc de s'interroger sur les possibilités à l'échelle d'un territoire d'optimiser les flux de nutriments. Pour quantifier ces flux, la modélisation est un outil pertinent permettant de spatialiser des résultats localisés et de caractériser les dynamiques temporelles de fertilité liée à ces flux. Berre *et al.* (2021) ont mobilisé la modélisation multiagent pour démontrer que le paillis à base de résidus de culture entraînait une baisse de la fertilité à l'échelle du territoire dans le sud du Burkina Faso.

Assogba *et al.* (2023) ont montré grâce à ce type de modèle que l'introduction des légumineuses améliore en effet la fertilité des sols, mais au détriment de la sécurité alimentaire des ménages. Celle-ci dépend largement des céréales et de la couverture des besoins fourragers des animaux. Les mêmes auteurs démontrent que ce sont les zones de pâtures extérieures au territoire qui permettent d'assurer la couverture des besoins fourragers et que l'apport d'azote exogène est indispensable pour maintenir la fertilité chimique des sols (Falconnier *et al.*, 2023).

Afin de saisir les processus en jeu et leurs conséquences à l'échelle du territoire, ces réflexions doivent intégrer les perceptions d'une diversité d'acteurs. Parmi les méthodes participatives innovantes, le développement de jeux sérieux a permis de fédérer les acteurs autour de problématiques à l'échelle du territoire (figure 17.2).



Figure 17.2. Mise en œuvre d'un jeu sérieux avec différents types d'acteurs pour mettre en discussion des flux de biomasse (gauche) ou des contraintes des éleveurs (points d'eau, zones de pâture) (droite). Crédit : photos de G. Assogba (photo de gauche) et de D. Dabire (photo de droite).

Ce descriptif montre l'importance d'une appréhension territoriale des questions liées à la dynamique locale des matières organiques du sol. Une partie des sols peut contribuer à produire de la biomasse et donc à capter du carbone alors que d'autres sols seront des réceptacles de matières organiques et de carbone. Tout comme raisonner la durabilité des systèmes et la sécurité alimentaire des populations, la séquestration du carbone dans le sol s'analyse en prenant en compte la complexité des systèmes de production agricole à l'échelle d'une unité territoriale. De même, l'histoire de ces systèmes agro-sylvopastoraux en région aride et semi-aride subsaharienne montre que les contraintes environnementales, sociales et économiques ne sont pas linéaires ou immuables. Cela nécessite de pouvoir estimer les risques sur le temps long des changements qui peuvent affecter cette complexité et *in fine* les processus de séquestration du carbone dans le sol, tout comme bien entendu la durabilité de ces agroécosystèmes.

La nécessité d'appréhender différentes échelles spatiales pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, notamment *via* le sol, et d'innover en matière d'espace est également illustrée à travers l'exemple du projet TerrAmaz dans des territoires amazoniens du Brésil, de Colombie, d'Équateur et du Pérou (voir chapitre 22).

3. La séquestration du carbone dans le sol et le risque de maladaptation

Outre la contribution à l'atténuation, décrite précédemment, la séquestration du carbone dans le sol participe de l'adaptation au changement climatique, dans la mesure où elle améliore la capacité du sol à aider un territoire à faire face aux aléas

climatiques. Par exemple, si le COS augmente, on peut s'attendre à un sol en meilleure santé, avec une meilleure productivité, avec un cycle des nutriments plus efficient pouvant impliquer des usages moindres d'engrais minéraux, avec des plantes moins sujettes à des attaques d'agents pathogènes donc un usage moindre de pesticides, avec des activités biologiques et une biodiversité mieux conservées, etc. Tout cela contribue à une réduction de la vulnérabilité de l'agrosystème concerné face aux changements climatiques en cours ou futurs.

Penser l'adaptation amène à s'interroger plus largement sur les conditions et sur la portée d'actions menées pour séquestrer du carbone dans le sol. Quelle est la vulnérabilité du territoire concerné aux conséquences du changement climatique? Dans quelle mesure la séquestration du carbone dans le sol contribue-t-elle à réduire cette vulnérabilité? Quels sont les autres déterminants susceptibles de faire évoluer la vulnérabilité d'un territoire? En effet, comme toute mesure relevant de l'action climatique, la séquestration du carbone correspond à un objectif parmi une multiplicité d'objectifs, notamment socio-économiques, pour un même territoire. Il s'agit de prendre en compte ces différents processus faisant fonctionner et évoluer le socio-écosystème dans lequel on considère la séquestration du carbone.

Si, du fait de ces processus ou d'un événement inattendu, une action visant l'adaptation au changement climatique a des effets néfastes et contraires aux effets positifs attendus, l'adaptation devient maladaptation (Reckien *et al.*, 2023 ; IPCC, 2023). Tel peut être le cas d'une mesure de restauration du sol qui ne tient pas compte des besoins de base des populations locales en cultures vivrières et bois de chauffe, d'une mesure permettant l'augmentation des rendements agricoles mais qui réduit la biodiversité ou qui augmente indirectement les émissions de GES.

Au-delà de l'idée que les interventions sont « bonnes » ou « mauvaises », la mise en évidence d'un continuum entre l'adaptation et la maladaptation souligne comment les interventions peuvent, de manière complexe et changeante, avoir des résultats mitigés sur la base d'un certain nombre de critères d'évaluation. Ces critères incluent les conséquences pour les personnes (qui bénéficie, qui est affecté négativement?) et sur les inégalités (sont-elles réduites, exacerbées?), pour les services écosystémiques (lesquels sont améliorés ou préservés, lesquels sont dégradés ou mis en péril?), pour le bilan global des GES. Il est nécessaire de proposer un cadre d'évaluation qui prenne en compte ces différents critères. Ce cadre devra être construit avec l'ensemble des parties prenantes. En effet, une évaluation dépend du contexte local dans lequel une planification de transformation est mise en œuvre, des personnes qui mettent en œuvre ces changements, et de celles qui évaluent et décident de la pertinence d'une adaptation.

Dans ce cadre d'évaluation, la question du temps est majeure. Les processus d'adaptation ont des impacts parfois à très long terme. Cela est le cas pour la constitution d'un stock de matière organique significatif qui prend plusieurs années, voire plusieurs décennies. Les difficultés apparaissent alors pour pouvoir évaluer le potentiel de stockage dans le sol ainsi que le bilan des flux de GES qui permettront l'objectif à atteindre et la possibilité de le mesurer. De même, tout au long de ce processus, des contraintes environnementales peuvent survenir, modifiant les processus biophysiques engagés. Par exemple, des évolutions climatiques peuvent agir de façon rétroactive sur les dynamiques biologiques qui déterminent la constitution du compartiment organique du sol. Mais de façon plus prégnante, il existe des risques importants de changements des conditions socio-

économiques des acteurs concernés, les obligeant à modifier des pratiques, comme supprimer des arbres dans un système agroforestier ou devoir s'adapter à un manque de force de travail, etc. Tous ces facteurs sont difficiles à déterminer sur le temps long. Il est cependant possible d'établir, à partir des critères de différenciation entre adaptation et maladaptation, des points de vigilance qu'il sera nécessaire d'observer et qui permettront de mener des actions correctives ou de lancer un nouveau processus d'adaptation.

4. Conclusion

Ce chapitre a montré que la séquestration du carbone dans le sol est porteuse de solutions pour atténuer les effets du changement climatique, au Nord comme au Sud, sous réserve qu'elle se décline de manière contextualisée. Il est fondamental de considérer la dimension territoriale, le sol pouvant être vu comme un capital foncier, car elle est garante de la prise en compte des dimensions socio-économiques et politiques et des interactions spatiales. Enfin, l'analyse des risques de maladaptation liés à la séquestration du carbone dans le sol s'avère essentielle pour gérer les enjeux de court et de long terme et pour rechercher la justice sociale, la condition indispensable à l'action climatique. C'est sous ces conditions que la séquestration du carbone dans le sol sera une solution pour atténuer le changement climatique et pour s'y adapter.

5. Références bibliographiques

- Amundson R., Biardeau L., 2018. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*, 115: 11652-11656. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1815901115
- Assogba G.G.C., Berre D., Adam M., Descheemaeker K., 2023. Can low-input agriculture in semi-arid Burkina Faso feed its soil, livestock and people? *European Journal of Agronomy*, 151.
- Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.013>
- Beillouin D., Corbeels M., Demenois J., Berre D., Boyer A., Fallot A., *et al.*, 2023. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nature Communications*, 14(1), 3700.
- Berre D., Diarisso T., Andrieu N., Le Page C., Corbeels M., 2021. Biomass flows in an agro-pastoral village in West-Africa: who benefits from crop residue mulching? *Agric Syst*, 187:102981. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102981>
- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.A., Vayssières J., Vigne M., 2022. L'efficiance pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. In : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*, Versailles, éditions Quæ, 86-104.
- Bossio D.A., Cook-Patton S.C., Ellis P.W., Fargione J., Sanderman J., Smith P., *et al.*, 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3(5), 391-398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., Gusiatin Z.M., Kucirik J., *et al.*, 2021. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Sci. Total Environ.* 796, 148756.
- Cardinael R., Chevallier T., Barthès B.G., Saby N.P.A., Parent T., Dupraz C., *et al.*, 2015. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, (259-260), 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>
- Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Béal C., Barthès B.G., Dupraz C., *et al.*, 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>

- Cardinael R., Guenet B., Chevallier T., Dupraz C., Cozzi T., Chenu C., 2018b. High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system - Combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15, 297-317. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-125>
- Cardinael R., Umulisa V., Toudert A., Olivier A., Bockel L., Bernoux M., 2018a. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environ. Res. Lett.* 13, 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaeb5f>
- Cherlet M., Hutchinson C., Reynolds J., Hill J., Sommer S., von Maltitz G. (Eds.), 2018. World Atlas of Desertification, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Cook-Patton S.C., Drever C.R., Griscom B.W., Hamrick K., Hardman H., Kroeger T., *et al.*, 2021. Protect, manage and then restore lands for climate mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 11, 1027-1034. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01198-0>
- Demenois J., Torquebiau E., Arnoult M.H., Eglin T., Masse D., Assouma M.H., *et al.*, 2020. Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(37), <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00037>
- Dignac M.-F., Derrien D., Barré P., Barot S., Cécillon L., Chenu C., *et al.*, 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- Don A., Seidel F., Leifeld J., Kätterer T., Martin M., Pellerin S., *et al.*, 2023. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation – Definitions and pitfalls. *Glob. Chang. Biol.* e16983. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>
- Edouard-Rambaut L.-A., Vayssières J., Versini A., Salgado P., Lecomte P., Tillard E., 2022. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. *Geoderma*, 425:116025. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116025>
- Falconnier G.N., Cardinael R., Corbeels M., Baudron F., Chivenge P., Couédel A., *et al.*, 2023. The input reduction principle of agroecology is wrong when it comes to mineral fertilizer use in sub-Saharan Africa. *Outlook on Agriculture*, 52,3, 311-326. <https://doi.org/10.1177/00307270231199795>
- FAO, 2022. Soils for nutrition: state of the art. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D., *et al.*, 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 259, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008>
- Giller K.E., Delaune T., Silva J.V., van Wijk M., Hammond J., Descheemaeker K., *et al.*, 2021. Small farms and development in sub-Saharan Africa: Farming for food, for income or for lack of better options? *Food Secur.* 1-24.
- IPCC, 2019. Summary for policymakers. *In: Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* Cambridge university press, 1-41.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J., 2012. Terrestrial Biosphere as a Source and Sink of Atmospheric Carbon Dioxide. *In: Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J. (Eds.), Recarbonization of the biosphere: ecosystems and the global carbon cycle,* Dordrecht, Springer, 1-15.
- Lehmann J., Cowieg A., Masiello C.A., Kammann C., Woolf D., Amonetteg J.E., *et al.*, 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 14, 883-892.
- Ma Y., Woolf D., Fan M., Qiao L., Li R., Lehmann J., 2023. Global crop production increase by soil organic carbon. *Nat. Geosci.* 16, 1159-1165. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01302-3>
- Nair P.K.R., Kumar B.M., Nair V.D., 2021. Global Distribution of Agroforestry Systems. *In: An Introduction to Agroforestry.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0_4
- Naudin K., Bruelle G., Salgado P., Penot E., Scopel E., Lubbers M., *et al.*, 2015. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agric. Syst.* 134, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.03.003>

- Noon M.L., Goldstein A., Ledezma J.C., Roehrdanz P.R., Cook-Patton S.C., Spawn-Lee S.A., *et al.*, 2022. Mapping the irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. *Nat. Sustain.* 5, 37-46. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00803-6>
- Olson K.R., Al-Kaisi M.M., Lal R., Lowery B., 2014. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 348-360. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.09.0412>
- Orounladji B.M., Sib O., Berre D., Assouma M.H., Dabire D., Sanogo S., Vall E., 2024. Cross-examination of agroecology and viability in agro-sylvo-pastoral systems in Western Burkina Faso. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(4), 581-609. <https://doi.org/10.1080/21683565.2024.2307902>
- Reckien D., Magnan A.K., Singh C., Lukas-Sithole M., Orlove B., Schipper E.L.F., *et al.*, 2023. Navigating the continuum between adaptation and maladaptation, *Nature Climate Change*, 13 (9): 907-918. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01774-6>
- Rosenstock T.S., Wilkes A., Jallo C., Namoi N., Bulusu M., Suber M., *et al.*, 2019. Making trees count: Measurement and reporting of agroforestry in UNFCCC national communications of non-Annex I countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 284, 106569.
- Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J., 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 9575-9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Sattari S.Z., Bouwman A.F., Martinez Rodriguez R., Beusen A.H.W., van Ittersum M.K., 2016. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. *Nature Communications*, 7, 10696. <https://doi.org/10.1038/ncomms10696>
- Siegwart L., Bertrand I., Rounsard O., Jourdan C., 2023. Contribution of tree and crop roots to soil carbon stocks in a Sub-Saharan agroforestry parkland in Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 352, 108524. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108524>
- Stahl C., Fontaine V., D  z  cache C., Ponchant L., Freycon V., Picon-Cochard C., *et al.*, 2016. Soil carbon stocks after conversion of Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers. *Regional Environmental Change*, 16, 2059-2069. <https://www.doi.org/10.1007/s10113-016-0936-0>
- Stahl C., Fontaine V., Klumpp K., Picon-Cochard C., Freycon V., Grise M.M., *et al.*, 2017. Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. *Global Change Biology*, 23(8), 3382-3392. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13573/full>
- Terasaki Hart D., Yeo S., Almaraz M., Beillouin D., Cardinael R., Garcia E., *et al.*, 2023. Priority Science Can Accelerate Agroforestry as a Natural Climate Solution. *Nat. Clim. Chang.* 13, 1179-1190. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01810-5>
- Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., von L  tzow M., Marin-Spiotta E., *et al.*, 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales, *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold M., 2021. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat. Commun.* 12, 2501.
- Zomer R.J., Bossio D.A., Trabucco A., Noordwijk M., Xu J., 2022. Global carbon sequestration potential of agroforestry and increased tree cover on agricultural land. *Circular Agricultural Systems*, 2:3. <https://doi.org/10.48130/CAS-2022-0003>
- Zougrana S.R., O  draogo S., Sib O., Bougouma-Yameogo V.M.C., Fayama T., Coulibaly K., *et al.*, 2023. Recycling crop and livestock co-products on agro-pastoral farms for the agroecological transition: more than 60% potentially recoverable in western Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Soci  t   et Environnement*, 27(4) : 270-283. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.20537>

L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coordinateurs

Éditions Quæ

Sur la même thématique aux Éditions Quæ

Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation

Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin, David Renaudeau, Éric Sauquet, coord. Collection Synthèses, 2025, 398 p.

Forêts et changement climatique.

Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres

François Courbet, Claude Doussan, Jean-Marc Limousin, Nicolas Martin-StPaul, Guillaume Simioni. Collection Synthèses, 2022, 144 p.

Les productions fruitières à l'heure du changement climatique.

Risques et opportunités en régions tempérées

Jean-Michel Legave, coord. Collection Synthèses, 2022, 464 p.

Pour citer cet ouvrage :

Blanfort V., Demenois J., Hrabanski M., 2025. *L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds*, Versailles, éditions Quæ, 416 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4009-8>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication (<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism

(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la Direction générale à la recherche et à la stratégie (DGD-RS) du Cirad.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4008-1

ISBN epub : 978-2-7592-4010-4

ISBN PDF : 978-2-7592-4009-8