

Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole

par Laurent AUGUSTO, Laurent SAINT-ANDRE, Fabrice BUREAU, Delphine DERRIEN, Noémie POUSSE et Lauric CECILLON

Les sols stockent la plus grande partie du carbone présent au sein des écosystèmes forestiers. Dans cet article, les auteurs décrivent les conséquences des pratiques de gestion sylvicole sur l'évolution des stocks de carbone organique dans les sols en forêt française métropolitaine.

Les sols stockent la majeure partie du carbone présent au sein des écosystèmes forestiers, avec plus de 100 tC/ha en moyenne dans le premier mètre du sol (DERRIEN, 2018). La séquestration durable — sur des périodes dépassant le siècle — de carbone organique dans les sols (COS) forestiers est un phénomène bien établi, notamment lors du boisement d'anciennes terres arables (POEPLAU *et al.*, 2011). Toutefois, certaines actions du forestier lors de la gestion sylvicole sont susceptibles de modifier, à la hausse ou à la baisse, les quantités de COS stockées (JANDL *et al.*, 2007). Cet article propose un point sur les connaissances concernant l'effet des pratiques de gestion sylvicole sur l'évolution des stocks de COS en forêt française métropolitaine. Il est basé sur l'état des recherches scientifiques portant sur les forêts tempérées ou boréales à travers le monde.

Récolte de biomasse

Lors de la récolte, le forestier modifie temporairement les entrées (par exemple des chutes de litière diminuées ou supprimées, ou des apports de résidus d'exploitation additionnels), et les sorties de carbone du sol (par exemple une décomposition accrue de la couche de litière, souvent d'autant plus que le stock de COS initial est important et que la mise en lumière est forte), au moins jusqu'à fermeture du couvert.

Un consensus scientifique se dégage pour démontrer qu'une éclaircie (récolte partielle des troncs) n'affecte pas significativement les stocks de COS des horizons minéraux du sol (Cf. Tab. I). Les résultats sont différents pour la couche de litière avec des pertes de carbone qui

Carbone et forêt méditerranéenne

Tab. I :

Effet des pratiques de gestion sylvicole sur la séquestration de carbone organique dans les sols forestiers tempérés.
(Résultats issus de l'étude 4 pour 1000 France, Inra - ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ; Ademe)

- ↗ Hauteur du stock de COS
- ↘ Baisse du stock de COS
- ↔ Stock de COS invariant
- ? Effet inconnu sur le stock de COS
- 🔒 Besoin de recherche

Actions du forestier	Effet sur le stock de carbone organique du sol	Besoins de recherche
Eclaircie	↔ Dépend du stock de C initial	
Coupe-rase	↘ Surtout en cas de perturbation du sol	🔒
Récolte des souches	↔ Mal connu sous climat tempéré	🔒
Récolte des houppiers	↘ Effet fonction du climat?	🔒
Plantation	↘ Comparaison à la régénération naturelle	
Préparation mécanisée du site	↘ A comparer au bilan C de l'écosystème	🔒
Densité de plantation	↔ Besoin de suivi à long terme	🔒
Diversité du peuplement	? Besoin de suivi à long terme	🔒
Identité du peuplement	? Besoin de suivi à long terme	🔒
Régime sylvicole	? Effet de l'historique du site	🔒
Structure d'âge du peuplement	? Effet de l'historique du site	🔒
Durée de rotation	? Effet de l'historique du site	🔒
Fertilisation azotée	↔ Effet très variable	
Apport de cendres	↔ Dépend du stock de C initial	
Apport de produits résiduaires organiques	↗ Transfert latéral de fertilité et de C	

1 - L'intensité d'éclaircie est définie ici comme le pourcentage de surface terrière prélevée ou le pourcentage d'arbres prélevés, en fonction du protocole des études de cas.

deviennent significatives lorsque le taux d'éclaircie dépasse un seuil d'environ 35 %. Au-delà de 55 % d'éclaircie, les pertes en carbone dans la couche de litière sont de l'ordre de -40 % (ACHAT *et al.*, 2015). L'effet des coupes rases (récolte totale des grumes ; Cf. photo 1) sur les stocks de COS est contrasté,



Photo 1 :

Travaux forestiers lors de la récolte après une coupe rase en Corrèze.

© P. Deuffic / Irstea.

notamment selon la profondeur de sol considérée et les interactions avec d'autres pratiques de gestion (résidus brûlés, travaux de préparation du site). Lorsque seules la couche de litière et la partie supérieure du profil minéral du sol sont prises en compte, la coupe rase diminue significativement (-10 % à -15 %) les stocks de COS (ACHAT *et al.*, 2015). Toutefois, lorsque l'ensemble du profil de sol est pris en compte, l'effet moyen de la coupe rase sur le stock de COS devient non-significatif, même si une tendance à la baisse subsiste (- 6 % ; ACHAT *et al.*, 2015). En effet, lors d'une coupe rase, une partie importante du COS perdue en surface n'est pas minéralisée mais peut être redistribuée plus en profondeur lors d'opérations de préparation du site.

La récolte des rémanents, en plus des troncs, pose de sérieuses questions concernant la fertilité des sols et la durabilité de la gestion forestière. Les stocks de COS sont diminués de manière d'autant plus forte par la récolte des houppiers que le nombre de compartiments du houppier (branches, brindilles et feuillage) récoltés est important. Ainsi, la récolte complète des houppiers (branches + brindilles + feuillage) conduit aux pertes maximales de carbone du sol (- 24 % dans la couche de litière). Sur l'ensemble du profil de sol, la récolte des houppiers entraîne en moyenne une perte de 11 %

du COS (ACHAT *et al.*, 2015 ; Cf. Tab. I). Concernant la récolte des souches, l'essentiel des connaissances actuelles provient de deux pays du nord de l'Europe. La récolte des souches n'y entraîne généralement aucun déstockage de COS, qui peut être compensée par une augmentation de la séquestration de carbone dans la biomasse. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la perturbation des sols induite par la récolte de souches n'entraîne pas de sur-minéralisation importante du COS. Toutefois, l'extrapolation à la forêt française demeure délicate et des recherches sont nécessaires sur notre territoire.

Gestion du couvert végétal de l'écosystème

Lors du renouvellement des peuplements forestiers, la gestion sylvicole influence les stocks de COS. Ainsi, les sols des forêts régénérées par plantation (Cf. Photo 2) montrent généralement une perte systématique de COS par rapport à ceux des peuplements forestiers en régénération naturelle (Cf. Tab. I). Ces pertes de carbone dans les sols des forêts plantées sont significatives dans la couche de litière (-15% en moyenne), comme dans la couche de sol minéral (-15% à -20% en moyenne, par rapport à des forêts primaires et secondaires en régénération naturelle). Les opérations de préparation du site, c'est-à-dire l'ensemble des travaux d'aménagements lors de l'installation ou de la régénération d'un peuplement forestier (Cf. Photos 3 et 4), modifient les stocks de COS. Une préparation mécanisée du site par labour induit une perte de COS substantielle dans la couche de litière (-35% en moyenne), mais pas dans le sol minéral (JAMES & HARRISON, 2016). Une redistribution latérale du COS est souvent observée lorsque des outils préparant des lignes de plantation sont utilisés. Lors du boisement d'anciennes terres arables faibles en COS, l'intensité des opérations de préparation du site module l'évolution des stocks de COS : la plantation manuelle (ou autre opération non intensive) induit une augmentation plus forte du stock de COS (+ 19 % sur 20 ans) qu'une préparation mécanisée du sol avec labour, formation mécanisée de billons et/ou de tranchées, et plantation à l'aide d'engins (seulement + 4 % sur 20 ans).



Photo 2 :
Plantation de douglas
du massif du Morvan
sur Alocrisol
(site expérimental FCBA
de Saint-Brisson
dans la Nièvre).
© L. Cecillon / INRA.

Au-delà de leurs effets généralement négatifs sur les stocks de COS, il est important de rappeler que les opérations de préparation du site entraînent souvent une augmentation de la séquestration de carbone dans la biomasse (en améliorant la croissance des arbres), susceptible de compenser les pertes de COS qu'elles génèrent, voire de constituer un puits net de carbone à l'échelle de l'écosystème forestier. Par ailleurs, il est relativement établi que les boisements effectués avec une densité de plantation forte ne voient pas leur stock de COS augmenter plus que ceux réalisés avec une densité de plantation faible. De même, aucune différence de stocks de COS n'a été observée dans des plantations de pin maritime (forêt des Landes) et de douglas (massifs forestiers du Limousin et du Morvan) entre des parcelles à forte ou à faible densité de plantation. Il ressort que la densité des peuplements forestiers, pour autant que le couvert végétal soit maintenu, n'a pas d'effet quantifiable sur les stocks de COS. Le choix des essences forestières est susceptible d'affecter les stocks de COS au travers de deux leviers : la biodiversité (le nombre d'espèces d'arbres présentes), et l'identité (la nature de l'espèce d'arbre — ou des espèces — présente(s)). Pourtant, concernant les peuplements plus diversifiés,

les résultats existants ne montrent qu'un effet très faible (0 à + 10 %) sur les stocks de COS. Outre le manque de données fiables, l'imprécision relative à l'effet de la biodiversité tient également au fait que les résultats sont extrêmement dépendants du contexte, qu'il s'agisse du climat, du type de sol, ou de l'identité des espèces qui composent les peuplements à forte biodiversité. L'identité des espèces (espèce ou groupe fonctionnel comme les conifères ou les fixateurs d'azote) a potentiellement plus d'impact sur le stock de COS que la biodiversité. Un résultat largement documenté est le plus grand stockage de carbone dans la litière sous les conifères (+ 100 % en moyenne, AUGUSTO *et al.*, 2015). Toutefois, lorsque l'ensemble du profil de sol est pris en compte, il n'existe plus de différence significative entre les conifères et les feuillus. C'est pourquoi dans l'état actuel des connaissances, aucun levier de gestion impliquant le choix des essences forestières ne peut être mobilisé pour augmenter les stocks de COS. De la même manière, il n'est pas encore possible de trancher quant au rôle séquestrant ou non d'autres leviers de gestion du couvert végétal en l'état actuel des connaissances (Tab. I). C'est notamment le cas du régime sylvicole (par exemple taillis, taillis sous futaie ou futaie), de la structure d'âge des peuplements, ou encore de la durée de rotation des peuplements dont l'allongement est prédict comme une pratique

« stockante » par la plupart des modèles. L'étude de ces leviers potentiels de séquestration de carbone dans les sols est difficile, tant il est compliqué d'étudier de telles modalités « toutes choses égales par ailleurs », ou de mettre en place et de suivre dans le temps long de tels essais.

Apports au sol de matières exogènes

Des apports exogènes de matières minérales ou organiques peuvent modifier les stocks de COS (Tab. I). C'est le cas de la fertilisation azotée des écosystèmes forestiers qui entraîne une réponse très variable du stock de COS, ne permettant pas de recommander cette pratique pour augmenter les stocks de COS forestiers. L'apport de cendres ne fait en moyenne pas varier significativement le stock de COS, mais il existe un risque de déstockage de COS qui augmente avec le stock de COS initial, à mettre au regard des gains potentiels de productivité de biomasse aérienne. L'apport aux sols forestiers de produits résiduaires organiques a un effet moyen positif sur le stock de COS (de l'ordre de + 20 %, dépendant de la dose apportée), sans influence nette du type de produit apporté.

(A)



(B)



Photos 3 et 4 :

(A) Travaux de préparation du site par travail du sol localisé (technique « 3B »), site expérimental Alter (pôle Renfor) d'Haguenau (Bas-Rhin) sur (B) Podzosol meuble rédoxique .
© N. Poussé - INRA.

Conclusion : quelle gestion sylvicole pour préserver et augmenter les stocks de COS ?

Les pratiques pour stocker du carbone dans les sols forestiers ne peuvent pas se raisonner indépendamment des cycles d'éléments nutritifs car les forêts sont en très grande majorité sur des sols pauvres, acides avec une recharge en éléments minéraux essentiellement basée sur les apports atmosphériques et l'altération des minéraux du sol. Ainsi, l'intensité des éclaircies, les compartiments exportés et la durée de révolution sont des paramètres importants pour le maintien de la fertilité des sols. Par ailleurs, la conversion ou le renouvellement des peuplements pour tenir compte des changements climatiques pourra avoir des conséquences sur le sol.

Au final, nous envisageons cinq grands cas potentiels sur lesquels la gestion sylvicole a des moyens de contribuer au stockage du carbone organique dans les sols forestiers. Ces cinq cas peuvent être regroupés en trois groupes, en fonction de leur potentiel de séquestration de COS.

– Les sols forestiers à fort potentiel de séquestration de COS (> 0,50 tC/ha/an)

Cas 1 – Les forêts « récentes » (boisement postérieur à 1960) sur d'anciens sols arables constituent un fort puits de COS pour les 40 prochaines années en cas de maintien de l'usage boisé (l'état d'équilibre des stocks de COS n'étant pas atteint 120 ans après le boisement, PŒPLAU *et al.*, 2011).

Cas 2 – La conversion par plantation de peuplements forestiers récents (type accrue naturelle sur terres arables abandonnées) avec des essences adaptées aux changements climatiques et à forte production en carbone constitue un second puits de COS fort et durable.

Pour ces deux cas de figures, il est possible de profiter à la fois des effets de séquestration de carbone dans l'écosystème (sol et biomasse), et des effets de substitution via la récolte de biomasse.

– Les sols forestiers à potentiel de séquestration de COS modéré (environ 0,17 - 0,35 tC/ha/an)

Cas 3 – Les forêts anciennes et gérées (publiques et privées) constituent un puits modéré de COS comme le démontrent les

observations de séquestration de COS en forêt domaniale gérée (JONARD *et al.*, 2019). Pour ces forêts, un taux conservatif d'environ 0,17 tC/ha/an peut être retenu (INRA-IGN, 2019). Pour ce cas, l'ambition est de conserver ce capital de séquestration de COS en évitant les coupes rases (régénération naturelle, conservation d'un couvert forestier, avec une préparation du sol minimale), et en adoptant des durées de rotation entre deux éclaircies supérieures aux pratiques actuelles.

– Les sols forestiers à potentiel de séquestration de COS faible et à risque important de perte de COS

Cas 4 – Dans les forêts surcapitalisées et en position d'être exploitées, deux solutions principales sont à déterminer selon le type de peuplement :

- pour ceux mités et/ou en situation de sur-stockage depuis longtemps, la plantation avec pas ou peu de travail du sol sera la solution la plus rapide et la moins coûteuse en perte de COS ;

- pour les autres peuplements, des éclaircies de faible intensité et rapprochées pour éviter des dégâts majeurs issus des tempêtes ou des attaques de pathogènes permettront d'éviter un déstockage important du COS. Les peuplements forestiers récents (type accrue naturelle) sur d'anciennes prairies rentrent aussi dans cette catégorie. Leur transformation réussie les intégrera dans le cas 3 des forêts gérées.

Cas 5 – Les forêts soumises à une forme de protection particulière (parcs, réserves, etc.) à gestion non orientée vers la production de bois vont probablement continuer à stocker du COS à condition qu'elles ne soient pas affectées trop fortement par les changements globaux ou par un aléa (tempête, incendie, épidémie). En revanche, la (re)mise en exploitation de ces forêts pourrait entraîner un déstockage de COS.

Laurent AUGUSTO
INRAE Centre de
Bordeaux Aquitaine,
Unité Interactions Sol
Plante Atmosphère

Laurent SAINT-ANDRÉ
Delphine DERRIEN
INRAE Centre de
Nancy, Unité
Biogéochimie des
Écosystèmes
Forestiers

Fabrice BUREAU
Université de Rouen-
Normandie, INRAE,
Laboratoire Ecodiv

Noémie POUSSE
ONF, Département
RDI

Lauric CÉCILLON
INRAE, Laboratoire
Ecodiv
PSL Research
University,
Laboratoire de
Géologie de l'ENS,
lauric.cecillon@
inrae.fr

Bibliographie

- Achat D.L., Fortin M., Landmann G., Ringeval B., Augusto L., 2015. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports*, 5. <http://dx.doi.org/10.1038/srep15991>
 Cet article est résumé dans “Conséquences de l'intensification des récoltes de biomasse sur le stockage de carbone en forêt”, 2016. Achat D., et Augusto L., *Forêt-entreprise* n° 230, p. 34-37

Remerciements :

Les auteurs remercient les pilotes (Sylvain Pellerin et Laure Bamière) et les participants de l'étude 4 pour 1000 France (Inra ; Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ; Ademe) dans le cadre de laquelle la majeure partie de ce travail a été réalisée. Une partie de ces travaux a été conduite dans le cadre du projet Capsol financé par l'Ademe.

- Augusto L., De Schrijver A., Vesterdal, L., Smolander A., Prescott C., Ranger J., 2015. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 90 (2): 444-466.
<http://dx.doi.org/10.1111/brv.12119>
- Derrien D., 2018. Le carbone organique des sols forestiers, un stock en constante évolution, *Forêt-entreprise* n° 242, p.44-48.
- Inra-IGN 2019. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? *Forêt-entreprise* n° 245, p. 43-50.
- James J., Harrison R., 2016. The effect of harvest on forest soil carbon: a meta-analysis. *Forests*, 7 (12). <http://dx.doi.org/10.3390/f7120308>

Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkkinen K., Byrne K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137 (3-4): 253-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>

Jonard M., Nicolas M. 2019. Les sols des forêts du réseau Renecofor séquestrent le carbone. *Forêt-entreprise* n° 245, p. 67-71.

Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A., 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17 (7): 2415-2427. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Cet article est publié avec l'aimable autorisation de *Forêt-Entreprise* dans lequel il est paru en mars-avril 2019 (n°245). Cette édition est disponible dans son intégralité en papier ou en numérique auprès de la librairie de l'IDF (idf-librairie@cnpf.fr ou foretpriveefrancaise.com ou 01 47 20 68 39).

Résumé

Les sols stockent la majeure partie du carbone présent au sein des écosystèmes forestiers, avec plus de 100 tC/ha dans le premier mètre du sol. La gestion sylvicole est susceptible de modifier, à la hausse ou à la baisse, les quantités de carbone stockées dans les sols. L'intensité des éclaircies, l'exportation de matières et la durée de révolution influent sur le maintien de la fertilité des sols. Les pratiques de gestion sylvicole raisonnées respectent le fonctionnement de l'écosystème et le carbone organique du sol.

Mots-clés : sols forestiers, séquestration de carbone, gestion sylvicole, pratiques.

Summary

Sequestration of organic carbon in forest soils: the impact of silvicultural management

Soils stock the main quantity of carbon present in forest ecosystems, with more than 100tC/ha in the first metre of soil. Silvicultural management is likely to modify the quantity of carbon stocked in the ground, either by increase or decrease. The intensity of thinning, the removal of material and the time frame for stand renewal all influence soil fertility. Rational silvicultural management practices respect the functioning of an ecosystem and the organic carbon in the soil.

