

# Les sols des forêts du réseau Renecofor se comportent-ils comme des puits de carbone ?

par Mathieu JONARD, Manuel NICOLAS, David COOMES, Isabelle CAIGNET, Anaïs SAENGER et Quentin PONETTE

*Renecofor est le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers. Ce dispositif se révèle très utile pour obtenir des éléments objectifs de comparaison et de connaissance sur la concentration en carbone des sols forestiers.*

## Le carbone des sols : un enjeu pour le climat

Les sols ont un rôle important à jouer dans la régulation du climat. Ils constituent une réserve considérable de carbone, sous forme de matières organiques, dont une augmentation minime (4 % par an) pourrait suffire à stopper l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. À l'inverse, une diminution de cette réserve pourrait contribuer à accélérer le réchauffement du globe. C'est à partir de ce constat que la France a lancé l'initiative « 4 pour 1000 », lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP21) en 2015, afin de promouvoir des pratiques de nature à préserver, voire à développer les stocks de carbone des sols. Il importe en retour de suivre l'évolution réelle de ces stocks.

## Engagements de la France et objectifs de l'étude

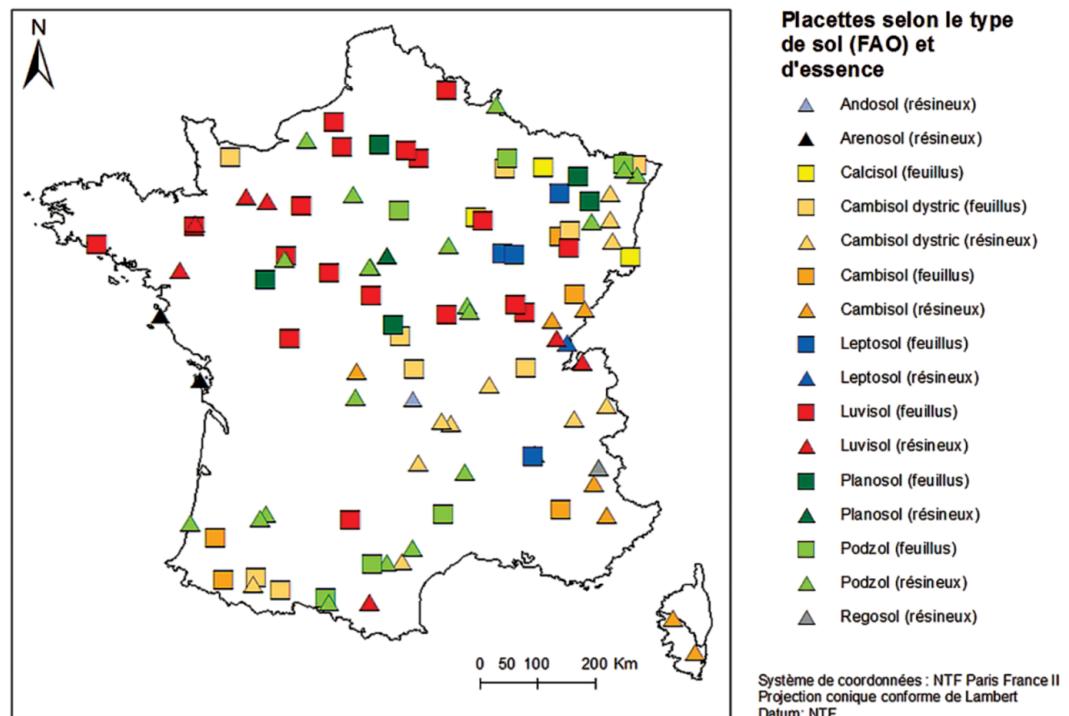
Dans le cadre des négociations internationales relatives aux changements climatiques (convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques), de nombreux pays, dont la France, ont signé le protocole de Kyoto et se sont engagés, pour la période 2008-2012, à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5 % par rapport au niveau de 1990. Plus récemment, lors de la COP 21, un nouvel accord a été obtenu avec comme ambition de limiter le réchauffement climatique à moins de 1,5 °C à l'horizon 2100. Dans cette optique, la France s'est engagée à réduire, d'ici à 2030, ses émissions de GES de 40 % par rapport au niveau de 1990.

Pour que l'on puisse vérifier le respect de leurs engagements, les pays signataires sont tenus de comptabiliser leurs émissions de GES et de fournir des rapports. Pour la période 2008-2012, la prise en compte de la foresterie dans cette comptabilité était optionnelle : la France avait choisi de l'intégrer en faisant l'hypothèse que les sols forestiers ne constituaient pas une source nette de carbone vers l'atmosphère, hypothèse qui demandait toutefois à être vérifiée. Par chance, la France était aussi l'un des rares pays doté d'un observatoire national disposant depuis peu de mesures répétées du stock de carbone des sols forestiers, le réseau Renecofor. C'est à la demande du ministère de l'Agriculture que nous avons analysé ces données, afin de déterminer si les sols forestiers français se comportent comme des sources ou comme des puits de carbone. Concrètement, le premier objectif était de détecter et de quantifier l'évolution du stock de carbone organique dans le sol. Dans un second temps, nous avons tenté d'identifier les facteurs et processus responsables des évolutions observées en nous basant sur deux types d'approches : une analyse statistique (procédure de sélection de variables) et une approche par bilan entre les flux d'entrée et de sortie de carbone.

## Comment le réseau Renecofor suit le carbone des sols forestiers ?

Cette étude s'est donc basée sur les données de sol collectées dans les 102 placettes du réseau Renecofor, lesquelles couvrent une large gamme d'essences, de climats et de sols (Cf. Fig. 1). Au sein de chaque placette, l'échantillonnage du sol a été effectué dans cinq grappes carrées fixes, une première fois entre 1993 et 1995, et puis 15 ans plus tard entre 2007 et 2012. Chaque grappe était divisée selon une grille comprenant 16 nœuds parmi lesquels 5 points de prélèvement ont été choisis de manière à obtenir une bonne répartition spatiale (Cf. Fig. 2). Pour chaque couche de sol, un échantillon composite a été constitué en rassemblant les échantillons d'une même grappe. Ce plan d'échantillonnage a été conçu de manière à bien cerner la variabilité intra-placette pour pouvoir mettre en évidence à moyen terme les éventuelles évolutions temporelles à l'échelle du site.

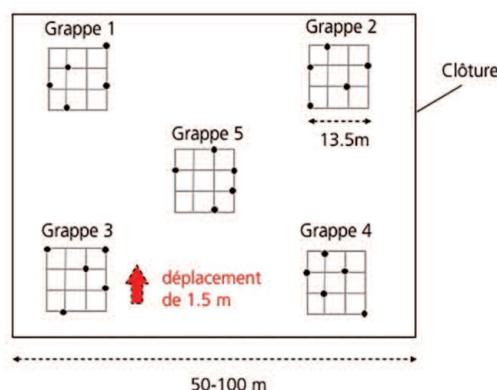
Le prélèvement des échantillons de sol s'est fait en 4 à 6 couches. Jusqu'à trois horizons organiques (OL, OF, OH) ont été individualisés dans l'humus. Pour le sol minéral, le prélèvement s'est fait par couche de pro-



fondeur fixée : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm. La teneur en carbone organique des échantillons a été déterminée par combustion sèche (après soustraction de la teneur en carbonates) en ce qui concerne les horizons organiques et la couche 0-10 cm et par la méthode Anne<sup>1</sup> pour les couches 10-20 et 20-40 cm. Aux deux campagnes, le stock de carbone de l'humus a été calculé en multipliant la masse de litière de chaque horizon organique par sa teneur en carbone organique et en sommant sur l'ensemble de ces horizons. Au niveau des couches minérales, le stock de carbone a été obtenu sur base de la teneur en carbone et de la densité apparente en tenant compte de la fraction d'éléments grossiers. Exactement les mêmes méthodes de prélèvement et d'analyse ont été mises en œuvre aux deux campagnes, ce qui rend les stocks de carbone tout à fait comparables d'une campagne à l'autre.

## Des stocks de carbone mesurés à la hausse

Comme le laps de temps séparant les deux campagnes de prélèvement de sol variait d'une placette à l'autre, l'analyse statistique a été faite sur la différence de stocks de carbone entre les deux campagnes, rapportée au temps écoulé. La variation annuelle du stock de carbone est significative uniquement pour les couches organiques et la couche 0-10 cm du sol minéral ainsi que pour le stock total (Cf. Fig. 3). Cette variation se faisant à la hausse, il s'agit d'une séquestration de carbone par le sol qui s'élève à 0,35 tC par ha et par an et qui, rapportée au stock de carbone du sol (en moyenne 81 tC/ha), est de l'ordre du fameux objectif de quatre pour mille (JONARD *et al.*, 2017). En l'extrapolant à l'ensemble des forêts françaises, ce puits de carbone équivaudrait approximativement à 5 % des émissions de GES dues à la combustion des énergies fossiles en France. Il s'agit bien évidemment d'un ordre de grandeur calculé en supposant que le réseau Renecofor soit représentatif de l'ensemble de la forêt française. Or, si le réseau a été conçu de manière à couvrir les principales essences de production dans une large gamme de contextes écologiques, certains types d'écosystèmes n'ont pas été considérés (ex. : forêts méditerranéennes). De plus, les placettes ont été installées uniquement en forêt publique et dans



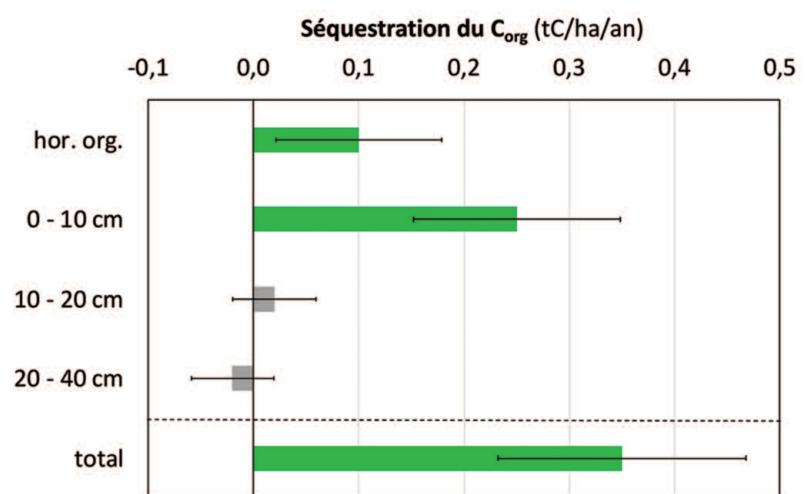
**Fig. 2 :**  
Plan d'échantillonnage du sol au sein d'une placette Renecofor (entre chaque campagne, les grappes sont déplacées de 1,5 m dans une direction donnée)

des peuplements matures dont le terme d'exploitabilité était encore éloigné ( $> 30$  ans). Initialement, la phase de régénération ne devait donc pas être prise en compte, mais les tempêtes de 1999 et 2009 ont hâté le renouvellement de certains peuplements ce qui rend finalement le réseau plus complet à cet égard. Même si le réseau Renecofor n'a pas été prévu pour être représentatif au sens strict du terme, nous sommes relativement confiants dans l'estimation du taux moyen de séquestration du carbone par les sols forestiers français. Ce chiffre sera affiné d'ici quelques années grâce aux données issues de la deuxième campagne d'échantillonnage du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) comprenant 2 200 placettes réparties selon un maillage de 16 km  $\times$  16 km et dont un quart des points se situent en forêt (NICOLAS *et al.*, 2014). Cependant, on peut déjà noter qu'en Allemagne, un taux de séquestration du carbone comparable à celui de la France a été mesuré (0,41 tC par ha et par an) sur un réseau comportant 1 800 placettes réparties sur l'ensemble du pays selon un maillage systématique de 8 km  $\times$  8 km (GRUNEBERG *et al.*, 2014).

1 - Une variante de la méthode Walkley-Black qui consiste à oxyder le carbone organique par un excès de  $K_2Cr_2O_7$  en milieu acide ( $H_2SO_4$ ) à 30 °C. La teneur en carbone organique est ensuite obtenue en dosant les ions  $Cr^{3+}$  réduits par colorimétrie.

**Fig. 3 :**  
Variation annuelle du stock de carbone organique (Corg) dans les différentes couches de sol.

Les barres d'erreurs correspondent aux intervalles de confiance à 95 %. La couleur gris foncé / verte indique que la variation est significative d'un point de vue statistique.



## Quels facteurs pourraient expliquer cette dynamique ?

Pour identifier les facteurs à l'origine de cette séquestration ou permettant de discriminer les placettes vis-à-vis de celle-ci, une série de variables potentiellement explicatives ont été présélectionnées et une méthode de sélection de variables leur a été appliquée, ce qui a permis de mettre en évidence l'effet de deux facteurs : l'âge et la structure du peuplement. La séquestration du carbone dans le sol diminue avec l'âge du peuplement et elle est plus élevée dans les peuplements irréguliers que dans les peuplements réguliers (Cf. Fig. 4). Ensemble, ces deux facteurs expliquent 14 % de la variabilité. Le fait que seule une faible proportion de la variabilité puisse être expliquée provient de la grande incertitude associée aux estimations du taux de séquestration du carbone à l'échelle du site. En effet, en 15 ans, la variation du stock de carbone organique du sol reste limitée et difficile à quantifier avec précision à cette échelle, du fait de la grande variabilité spatiale des sols.

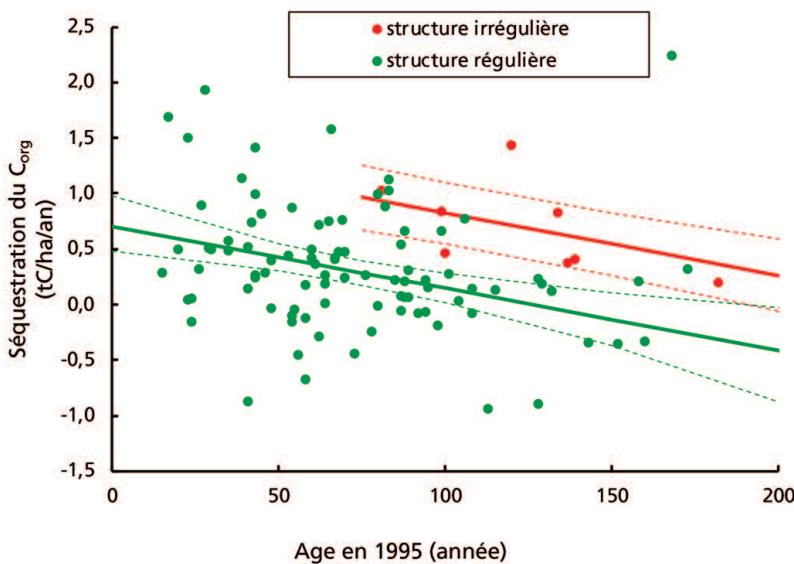
**Fig. 4 :**  
Effet de l'âge du peuplement et de sa structure sur le taux de séquestration du carbone organique (C<sub>org</sub>) dans les sols forestiers du réseau Renecofor.

La procédure de sélection de variables n'a pas retenu l'essence comme facteur explicatif. Toutefois, les sols des essences résineuses (à l'exception du douglas) ont un taux de séquestration du carbone nettement plus élevé que les sols de feuillus (0,49 vs 0,20 tC/ha/an). Si cet effet ne ressort pas de l'analyse statistique, c'est parce qu'il est confondu avec celui de l'âge et également

avec l'ancienneté de l'état boisé. Les peuplements résineux sont en moyenne plus jeunes que les peuplements feuillus et le temps depuis lequel les placettes résineuses sont sous forêt est en général plus court. Il est donc difficile de dire s'il y a vraiment un effet de l'essence ou pas. Quoi qu'il en soit ces résultats suggèrent que la gestion forestière pourrait influencer la séquestration du carbone dans le sol en jouant sur l'essence, le type de traitement et le terme d'exploitabilité. L'effet de ces facteurs demanderait néanmoins à être confirmé sur la base de dispositifs de recherche en conditions contrôlées.

## Quels processus pourraient être impliqués ?

Pour mieux comprendre quels pourraient être les processus responsables de la séquestration du carbone dans le sol, une approche par bilan « entrées-sorties » a été réalisée pour une placette fictive représentative de l'ensemble du réseau. Ce bilan a été effectué pour la partie superficielle (horizons organiques) et pour la partie profonde (sol minéral) en supposant que les stocks de carbone étaient à l'équilibre lors de la première campagne de prélèvement. Pour l'humus, cette approche a permis d'estimer un taux de séquestration qui correspond bien au taux observé. Elle a en outre montré que la séquestration de carbone dans le sol est vraisemblablement due à une diminution du taux de décomposition suite à une détérioration de la qualité chimique des litières entre 1995 et 2012 (hausse constatée du rapport carbone/azote). Pour les couches minérales, le taux de séquestration estimé par l'approche de bilan est nettement inférieur aux observations, ce qui laisse à penser que l'état d'équilibre n'était pas atteint lors de la première campagne de mesure et que la production de litière était supérieure à sa décomposition. Cette hypothèse d'un déséquilibre préexistant permet d'expliquer le taux de séquestration observé et s'avère tout à fait compatible avec l'effet négatif de l'âge du peuplement sur le taux de séquestration du carbone dans le sol. Les sols des peuplements les plus âgés étant plus proches de l'état d'équilibre, ils accumulent moins de carbone.



## Quel devenir de la capacité de séquestration des sols ?

Au terme de cette étude, une série de questions demeurent. La séquestration du carbone dans les sols forestiers va-t-elle se poursuivre à long terme et au même rythme ? Ou bien ces sols pourraient-ils devenir au contraire une source de carbone ? Quelle est la stabilité du carbone nouvellement accumulé ? Quels sont les processus en jeu ?

Face à toutes ces questions, le réseau Renecofor apporte des connaissances et un support de recherche précieux pour mieux comprendre la dynamique du carbone des sols. Il permet par exemple d'évaluer la capacité de modèles de recherche issus de l'état des connaissances théoriques (modèle Yasso<sup>2</sup>) à prédire l'évolution des stocks de carbone constatée dans les sols (MAO *et al.*, soumis). D'autres études sont en cours afin de déterminer la stabilité du carbone dans les échantillons de sol du réseau grâce à la pyrolyse Rockeval (SOUCEMARIANADIN *et al.*, 2018) et au dosage de la glomaline. Par ailleurs, le réseau Renecofor a participé en 2017 à l'expérimentation mondiale Tea bag index (<http://www.teatime4science.org>) dont le principe est d'utiliser des sachets de thé pour évaluer la vitesse de décomposition des matières organiques dans une grande diversité de contextes écologiques. L'enjeu de ces travaux de recherche est de mieux connaître la capacité de séquestration du carbone par les sols forestiers et de pouvoir prévoir son devenir sous l'effet des changements environnementaux.



**Photo 1 :**

Placette Renecofor de l'ONF dans une sapinière de Coudons (Aude).

G. Sajdak © CNPF

Mathieu JONARD  
Isabelle CAIGNET  
Anaïs SAENGER  
Quentin PONETTE  
Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute  
Environnemental Sciences, Croix du Sud, Boîte L7.05.09,  
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique  
mathieu.jonard@uclouvain.be  
quentin.ponette@uclouvain.be

Manuel NICOLAS  
Office national des forêts, département Recherche-développement-innovation  
Bd de Constance  
77300 Fontainebleau, France  
manuel.nicolas@onf.fr

David COOMES  
University of Cambridge,  
Department of Plant Sciences, Forest Ecology and Conservation Group,  
Downing Street, Cambridge CB2 3EA, UK  
dac18@cam.ac.uk

## Bibliographie

- Gruneberg E., Ziche D., Wellbrock N., 2014. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology*, 20, 2644–2662.
- Jonard M., Nicolas M., Coomes D.A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574, 616–628.
- Mao Z., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., Nicolas M., Jonard M., Saint-André L., Submitted. Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests using Yasso07. *Biogeochemistry*.

Nicolas M., Jolivet C., Jonard M., 2014. L'apport des dispositifs de suivi vis-à-vis des enjeux de fonctionnement et de gestion des écosystèmes forestiers en relation avec les sols. *Revue Forestière Française*, LXVI, 491-500.

Soucemarianadin L.N., Cécillon L., Guenet B., Chenu C., Baudin F., Nicolas M., Girardin C., Barré P., 2018. Environmental factors controlling soil organic carbon stability in French forest soils. *Plant Soil*, 426, 267–286.

2 - Yasso est un modèle de dynamique du carbone du sol développé par l'institut finlandais de l'environnement.

## Remerciements :

Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué à la mise en place et la maintenance du réseau Renecofor, à la collecte de données et à l'assurance qualité. Renecofor fait partie du programme PIC-Forêts et a toujours été soutenu par des fonds publics français (Office national des Forêts, ministère de l'Agriculture, ministère de l'Écologie, Ademe) et par l'Union européenne de 1991 à 2006. Nous tenons également à remercier le laboratoire d'analyse des sols de l'Inra d'Arras (LAS) et le laboratoire d'analyse et de recherche de l'Aisne (LDAR 02) pour le traitement et l'analyse des échantillons ainsi que pour les discussions fructueuses sur les méthodes d'analyse des sols.

## Résumé

---

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).

Les sols forestiers constituent une grande réserve de carbone dont l'évolution importe dans le cadre des engagements internationaux pour le climat. En France, le réseau Renecofor a permis pour la première fois de quantifier cette évolution à partir de mesures répétées à 15 ans d'intervalle sur 102 sites répartis dans la forêt métropolitaine. En moyenne, les sols de ce réseau ont accumulé 0,35 tC/ha/an, principalement dans la couche 0-10 cm du sol minéral. Cette séquestration du carbone par le sol tend à diminuer avec l'âge des peuplements et à être affectée par sa structure, suggérant qu'elle pourrait être influencée par des choix de gestion forestière. Une grande part de sa variabilité reste néanmoins inexpliquée. Les recherches doivent se poursuivre pour mieux comprendre la dynamique du carbone des sols et pouvoir prévoir son évolution sous l'effet des changements environnementaux.

Mots-clés : sol, séquestration du carbone, suivi à long terme des forêts, Renecofor.

## Summary

---

### Do the soils of the Renecofor network act as carbon sinks?

Forest soils constitute a huge reserve of carbon whose evolution has consequences within the framework of international commitments concerning climate. In France, the Renecofor network has enabled researchers to calculate quantitative changes for the first time using measurements made at a 15-year interval on 102 sites throughout metropolitan France's forests. On average, the soils belonging to this network accumulated 0.35 tC/ha/yr, mainly in their top 10 cm of mineral soil. Such carbon sequestration by soils tends to decline with the aging of the stands and is affected by soil structure, thus suggesting that choices in forestry management may well impact sequestration. A large part of the variability in sequestration remains as yet unexplained. Research is still needed to better understand the dynamics of carbon in the ground and to predict its evolution under the effect of changes in the environment.

