

LE RÔLE DE PUIXS DE CARBONE DES SOLS FORESTIERS : RÉSULTATS DE MESURES ET HYPOTHÈSES EXPLICATIVES

Mathieu Jonard

Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute

Le rôle de puits de carbone des sols forestiers : résultats de mesures et hypothèses explicatives

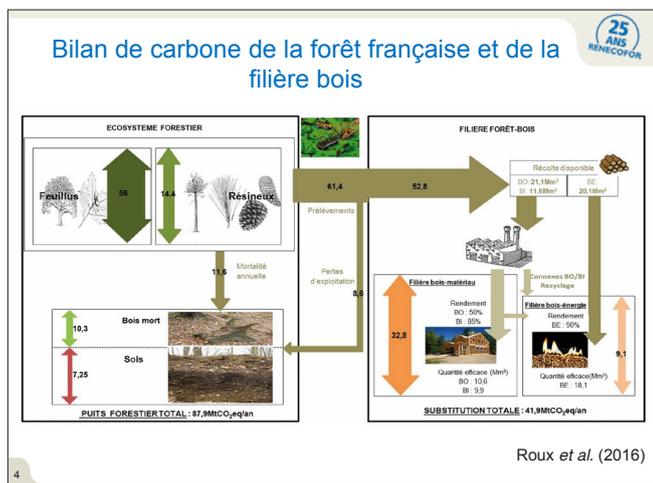
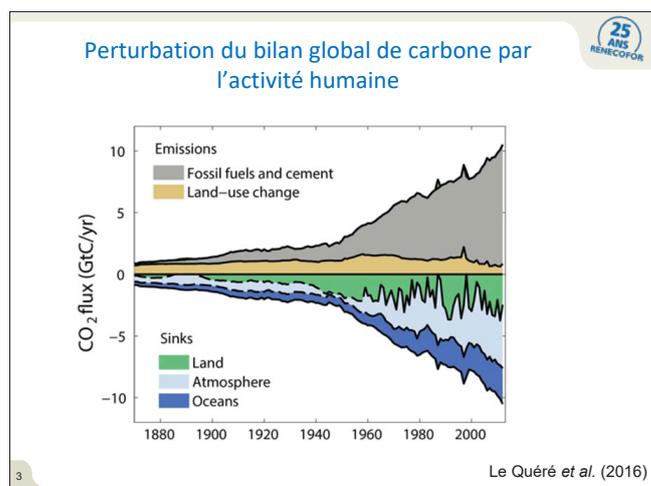
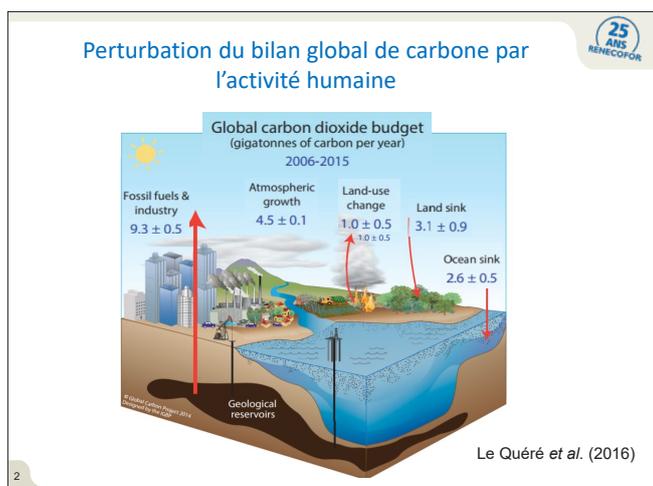
Mathieu Jonard, Manuel Nicolas, David Coomes, Isabelle Caignet, Anaïs Saenger et Quentin Ponette

Au nom d'une petite équipe de recherche, je vais vous parler des sols forestiers et de leur rôle dans le cycle du carbone. Agissent-ils comme des puits ou des sources et quels sont les processus en jeu ?

Pourquoi cette étude ?

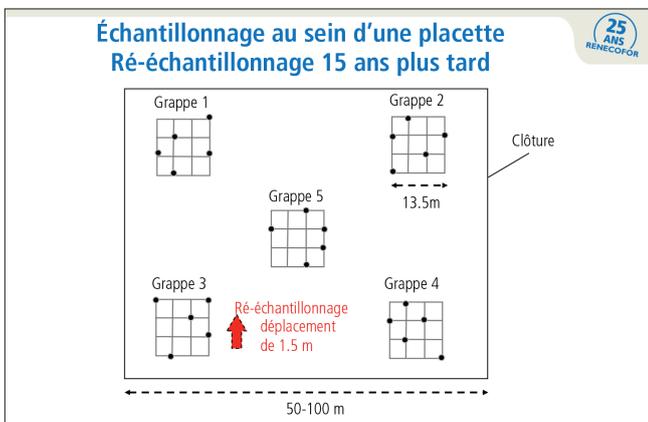
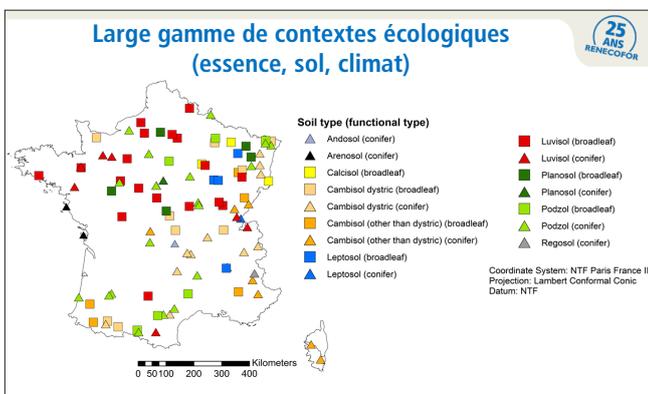
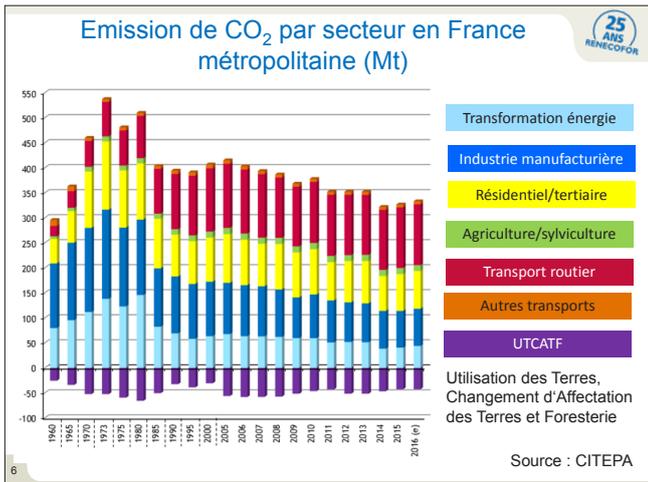
L'activité humaine perturbe fortement le cycle du carbone en générant des émissions par combustion des énergies fossiles, et aussi par changement de l'utilisation des terres.

Ainsi les émissions de CO₂ ont augmenté peu à peu depuis la révolution industrielle et de manière accélérée à partir du milieu du 20^e siècle. Ce carbone émis se retrouve dans la végétation, les océans et de plus en plus dans l'atmosphère, ce qui génère le réchauffement climatique que l'on connaît. On peut dire en moyenne **à l'échelle planétaire** qu'un tiers du carbone émis se retrouve dans la végétation.



À l'échelle française, Christine Deleuze en parlait en introduction, une étude INRA/IGN a montré qu'environ 20 % des émissions de CO₂ sont « fixées » par la forêt, en tenant compte des effets de substitution de la filière bois.

Pour ce qui relève des écosystèmes forestiers uniquement, les auteurs de l'étude ont montré qu'environ 8 % du carbone fixé par la végétation se retrouvent dans le sol. Cette estimation de 8 % est basée sur une analyse approfondie de la littérature, mais elle mérite d'être affinée, notamment en ce qui concerne la comptabilisation des émissions de CO₂ en France dans le cadre du protocole de Kyoto.



Prélèvement des échantillons de sol

4 à 6 couches individualisées

- 1 à 3 horizons organiques
- 0-10 cm
- 10-20 cm
- 20-40 cm

Rappelons que les pays signataires du protocole de Kyoto se sont engagés à limiter leurs émissions au niveau de 1990 pour la période 2008-2012. Et pour la période d'engagement supplémentaire 2013-2020, ils ont l'ambition plus grande de les réduire de 20 % par rapport au niveau de 1990, avec la possibilité de prendre en compte, de manière optionnelle, l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF). C'est ce que la France a choisi de faire : elle prend en compte cette rubrique qui, contrairement à toutes les autres agit comme un puits. En ce qui concerne les sols forestiers, l'hypothèse qui a été faite c'est que les sols ont un rôle neutre vis-à-vis des émissions de CO₂. Mais il fallait vérifier ou étayer cette hypothèse et c'est pourquoi le ministère de l'Agriculture a commandé et financé cette étude.

Objectifs et données utilisées

Concrètement, l'objectif de l'étude était de répondre à 3 questions :

- Les sols forestiers français sont-ils des sources ou des puits de carbone ?
- Quel est le taux de séquestration/émission de carbone pour le sol ?
- Quels sont les facteurs et processus responsables des évolutions observées ?

Pour y parvenir, nous disposons des données du réseau RENECOFOR, qui couvre une large gamme de contexte écologiques en termes d'essences, de sols et de climats. Vous avez ici une carte des placettes, qui montre la diversité des sols.

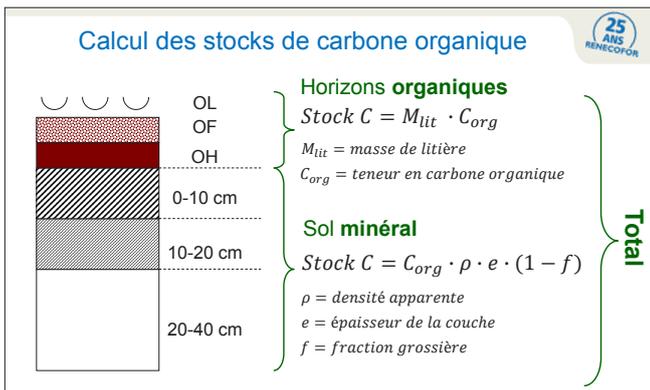
Nous disposons des données de deux campagnes d'échantillonnage des sols. La première campagne a eu lieu entre 1993 et 1995. Au sein d'une placette, l'échantillonnage est réalisé par « grappes » : 4 grappes en périphérie et une au centre. Chaque grappe repose sur une grille à 16 nœuds et de ces 16 nœuds on choisit 5 points représentatifs de la grappe. La seconde campagne, environ 15 ans plus tard (de 2007 à 2012), a suivi le même plan d'échantillonnage, sauf que les grappes ont été décalées de 1,5 m dans une direction fixée.

Le prélèvement des échantillons s'est fait par couche et tous les échantillons d'une même grappe ont été rassemblés de manière à faire un échantillon composite de chaque couche. Selon les sites, on a 1 à 3 couches organiques, et le sol minéral a été prélevé par couches de profondeur fixée : 0-10 cm ; 10-20 cm ; 20-40 cm.

La teneur en carbone organique a été déterminée par combustion sèche pour les horizons organiques et la couche 0-10 cm, et par la méthode Anne, qui est une adaptation de la méthode Walkley-Black pour les couches 10-20 et 20-40 cm.



Photo : Luc Croisé, ONF

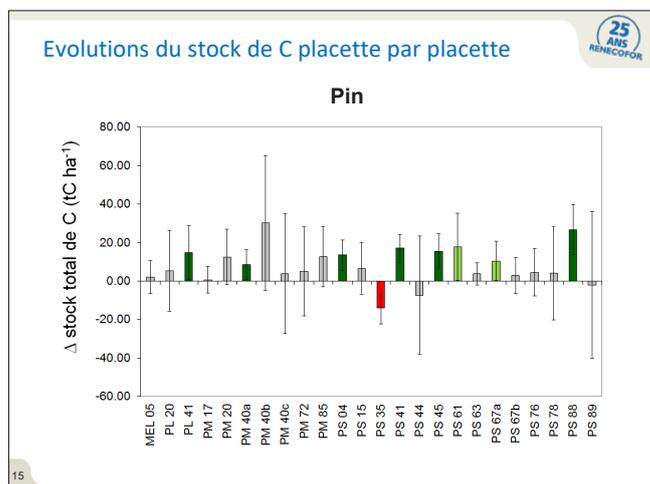
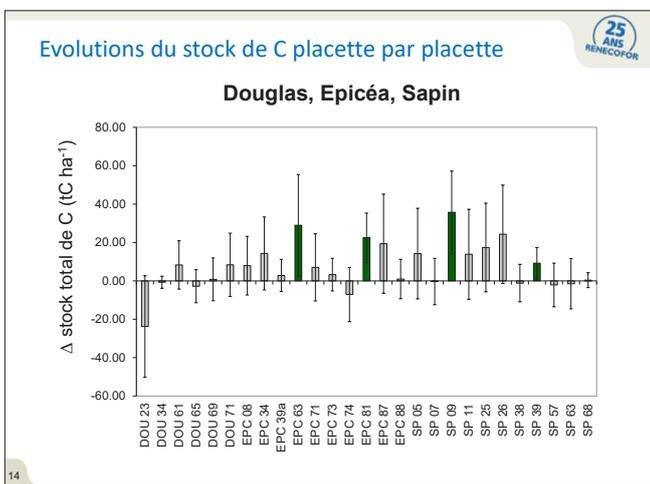
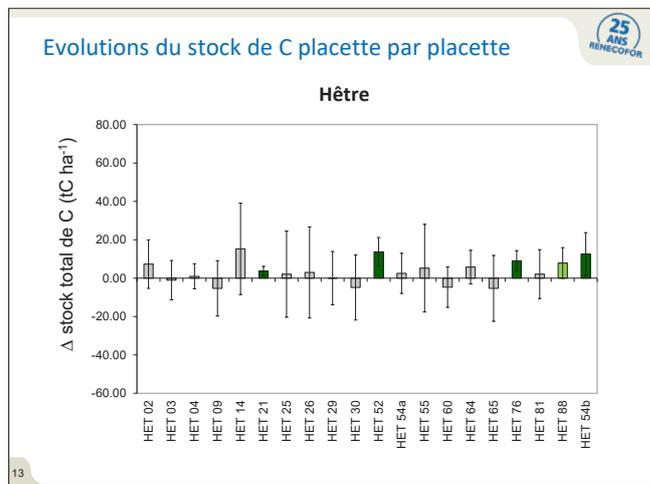
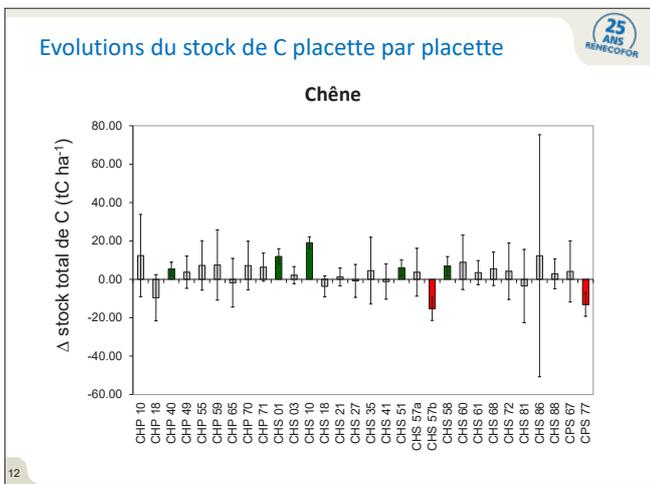
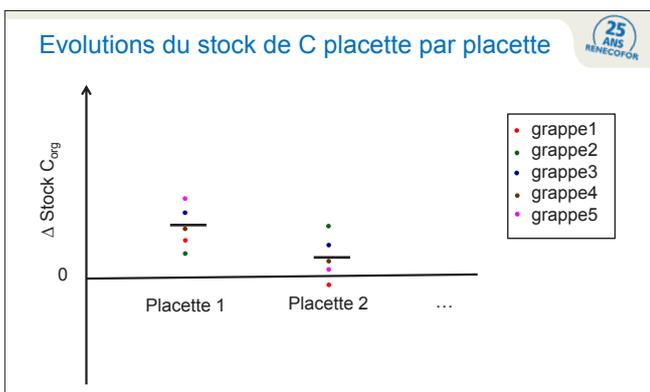


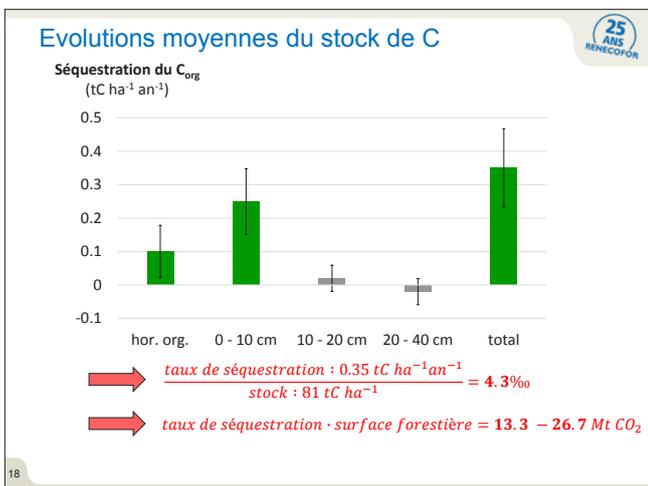
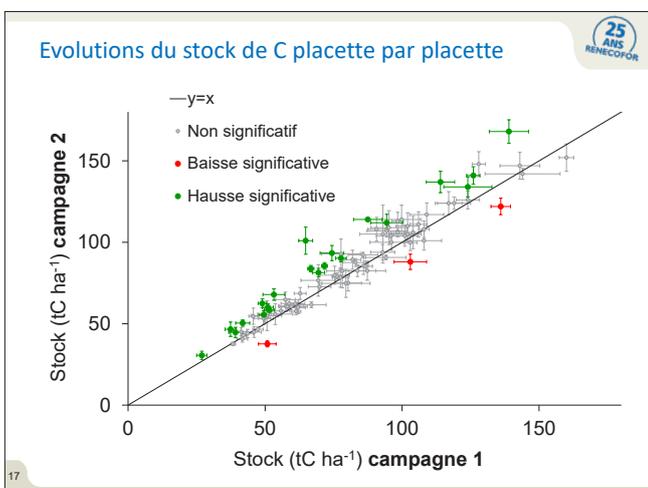
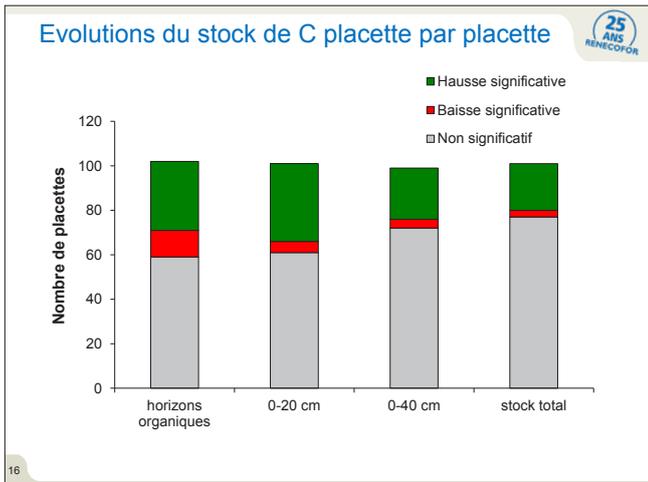
Calcul de la variation du stock de carbone

Nous avons commencé par calculer les stocks pour les deux campagnes. Pour les horizons organiques, c'est facile : c'est la masse de litière multipliée par la teneur en carbone organique. Pour le sol minéral, c'est la teneur en matière organique multipliée par la densité apparente et l'épaisseur de la couche, en tenant compte aussi de la fraction grossière qui n'est pas prise en compte dans la mesure de la densité apparente.

Ce calcul nous a permis d'estimer la variation de stock entre les deux campagnes. Et grâce aux répétitions au sein d'une même placette nous avons pu tester si cette variation de stock était significativement différente de 0 ou pas, d'abord placette par placette.

Voici le résultat, en ce qui concerne la variation de stock total, pour les placettes de chêne, pour le hêtre, pour le Douglas, l'épicéa et le sapin, et enfin pour les pins : quand l'évolution est significative à la hausse, elle est représentée en vert, et quand c'est significatif à la baisse, c'est en rouge.





Les résultats par placette

Regardons maintenant couche par couche : examinons la proportion de placettes où on a une évolution significative à la hausse (en vert) ou à la baisse (en rouge) et celle des placettes où on n'a pas d'évolution significative.

On voit que les évolutions significatives sont plus nombreuses pour les couches organiques ; ça diminue à peine dans la couche 0-20 cm, et bien plus nettement sur 0-40 et c'est pour le stock total qu'on a le moins d'évolutions significatives. On voit aussi que les évolutions significatives sont en grande majorité des évolutions à la hausse, mais que les évolutions non significatives restent prépondérantes.

Une autre manière de représenter les choses, ici pour le stock total, c'est de mettre en relation le stock à la campagne 2 avec le stock à la campagne 1. Tous les points qui se trouvent au-dessus de la diagonale concernent des placettes où le stock s'est accru, mais seules les placettes représentées par des points verts ont une évolution significative. De même, tous les points qui sont sous la diagonale ont une évolution à la baisse, mais qui n'est significative que pour 3 placettes (points rouges). Vous pouvez voir avec la barre d'erreur qu'il y a une forte incertitude, due à l'hétérogénéité spatiale au sein d'une placette ; 15 ans c'est une durée qui est encore relativement limitée pour mettre en évidence une évolution à l'échelle de la placette.

Les résultats à l'échelle du réseau

C'est pourquoi nous avons aussi fait des analyses à l'échelle du réseau en regroupant l'ensemble des placettes. Ces analyses ont montré que la séquestration du carbone, j'entends par là la variation de stock rapportée au nombre d'années entre les deux campagnes, cette séquestration est significative à l'échelle de la France. Pour les horizons organiques, elle est de l'ordre 0,1 tonne de carbone par hectare et par an. Pour l'horizon 0-10 cm, c'est-à-dire l'horizon minéral superficiel, elle s'élève à 0,25 tC/ha/an. Il n'y a pas d'évolution significative entre 10 et 40 cm et au total on a une séquestration de C qui est de l'ordre de 0,35 tC/ha/an. Qu'est-ce que ça représente ? Si on rapporte ça au stock total moyen calculé pour la première campagne, ça équivaut à 4 pour 1000 pour les sols forestiers du réseau. Si je fais un exercice un peu plus périlleux, en considérant que le réseau est représentatif de la forêt française, et que je multiplie ce taux de séquestration par la surface forestière, j'obtiens un chiffre qui est de l'ordre de 20 millions de tonnes de CO_2 fixées chaque année. C'est un chiffre qui varie, si on tient compte de l'incertitude, entre 13 et 27 millions de tonnes de CO_2 par an et ça représente environ 5% des émissions. C'est juste pour donner un ordre de grandeur.

Ceci dit, nos estimations trouvent une petite confirmation chez les Allemands qui ont fait, eux, l'analyse sur un réseau systématique : ils n'ont pas de séquestration dans les couches holorganiques mais la séquestration obtenue pour la couche 0-10 cm est du même ordre de grandeur ou même plus (je crois que c'est de l'ordre de 0,22 tC/ha/an). Nous sommes vraiment au même niveau.

Identification des facteurs explicatifs

Procédures de sélection de variables

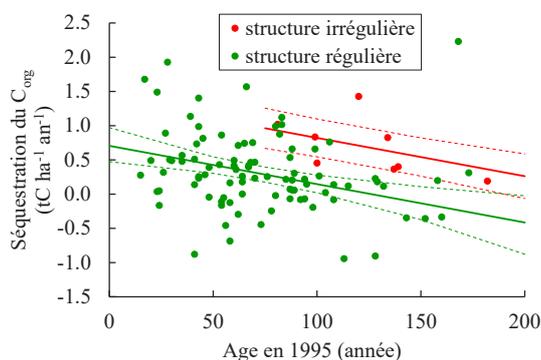
- Régression pas à pas, méthode *lasso* ou *elastic net*
- Critères : R^2 , P valeur, AIC, BIC, SBC

Variabiles présélectionnées

- Géo / topographie : coord., altitude, pente, orientation, topographie
- Peuplement : type d'essence, structure, âge, N/ha, G, ancienneté état bois
- Perturbations : intensité des éclaircies, dégâts des tempêtes
- Climat : type de climat, précipitations, T° de l'air
- Sols : type de sol, profondeur, RUM, hydromorphie, % argile, oxyhydroxydes de Fe et Al, pH eau, S/T, C/N, stock de C litière/stock total
- Dépôts d'azote hors couvert

25 ANS
RENECOFOR

Effet de l'âge et de la structure sur la séquestration du carbone organique

25 ANS
RENECOFOR

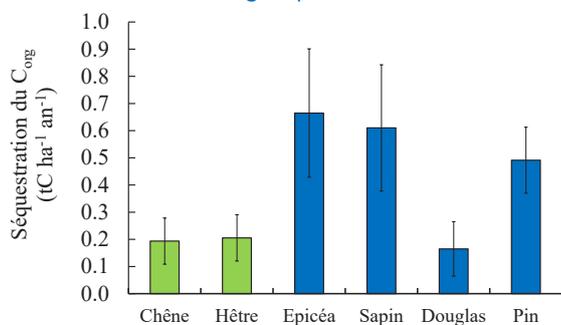
Les facteurs explicatifs de la séquestration du carbone dans le sol

Pour identifier les facteurs qui sont responsables de cette séquestration du carbone, ou bien différencier les placettes vis-à-vis de cette séquestration, nous avons utilisé toute une série de variables qui caractérisent la position géographique, le peuplement, le sol... et nous avons mis en œuvre une procédure statistique de sélection de variables pour faire ressortir les facteurs les plus importants. Il en ressort deux facteurs : l'âge du peuplement et la structure du peuplement.

La séquestration du carbone dans le sol a tendance à diminuer avec l'âge du peuplement. Je dis bien la séquestration, pas le stock. Le stock de carbone du sol, lui, augmente avec l'âge du peuplement, mais il augmente moins vite à mesure que le peuplement vieillit. La séquestration diminue donc avec l'âge du peuplement et elle est plus élevée dans les structures irrégulières que dans les structures régulières. Nous avons peu de placettes en structure irrégulière mais vous voyez que quasiment tous les points sont plus hauts que la moyenne des points pour la structure régulière.

De l'analyse ne ressort pas l'effet essence. Pourtant quand on s'intéresse à l'effet essence, on voit que les peuplements résineux séquestrent dans leurs sols nettement plus de carbone que les peuplements feuillus. Nous supposons que cet effet ne ressort pas de l'analyse statistique parce qu'il est confondu avec un effet âge : les résineux sont en général plus jeunes et ont un historique de boisement plus récent. Il y a donc un effet essence en forme de point d'interrogation : l'effet essence est-il bien réel ou confondu avec l'effet âge et ancienneté de l'état boisé ?

Effet de l'essence sur la séquestration du carbone organique

25 ANS
RENECOFOR

→ confusion possible avec l'effet de l'âge ou de l'ancienneté de l'état boisé

Quels pourraient être les processus sous-jacents ?

Pour comprendre les processus qui génèrent cette séquestration de carbone, nous avons appliqué une approche par bilan de masse. Nous l'avons appliquée à la partie aérienne (les horizons organiques) et à la partie souterraine (le sol minéral) en considérant deux moments clés : le début de la période d'observation (la 1^{re} campagne de prélèvements) et le milieu de la période d'observation (entre les deux campagnes).

En ce qui concerne le bilan de masse réalisé à la première campagne, nous nous sommes basés sur les mesures du réseau pour estimer l'apport de litière aérienne. Et comme nous n'avions pas d'estimation pour la litière racinaire, nous avons utilisé des relations empiriques à partir des retombées de litière aérienne. Et nous avons fait une hypothèse assez forte de stationnarité, en considérant qu'à la première campagne les stocks étaient à l'équilibre (pas de variation de stock). Du coup, il était facile de déduire la perte de carbone par décomposition : s'il n'y a pas de variation de stock, elle est égale aux apports de litière.

Bilan de masse à la 1^{ère} campagne

Horizons organiques

litière aérienne :
2.15 tC ha⁻¹ an⁻¹

$\Delta C_{org} = 0$

décomposition :
2.15 tC ha⁻¹ an⁻¹

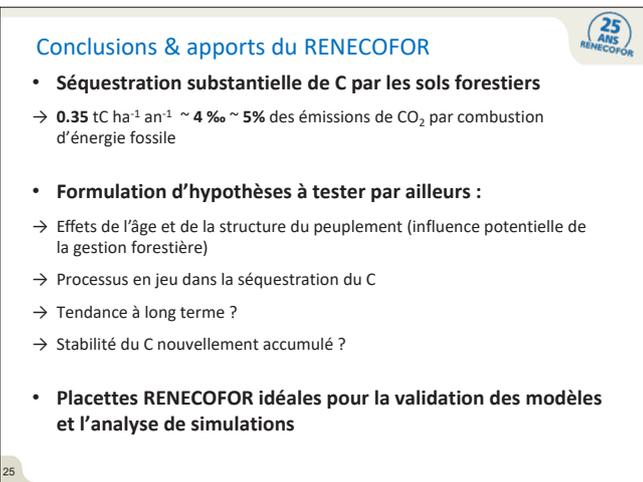
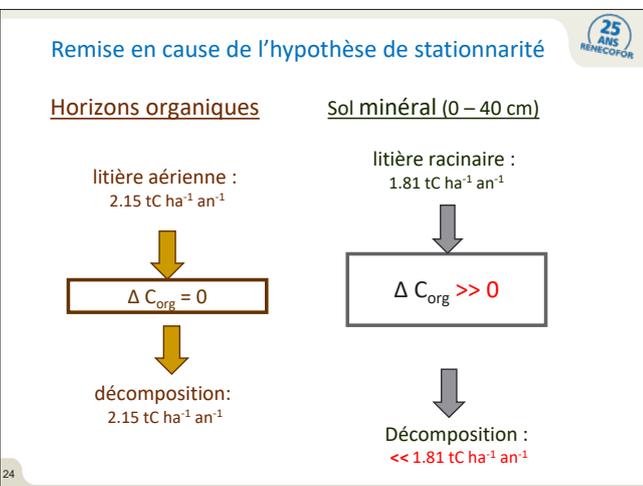
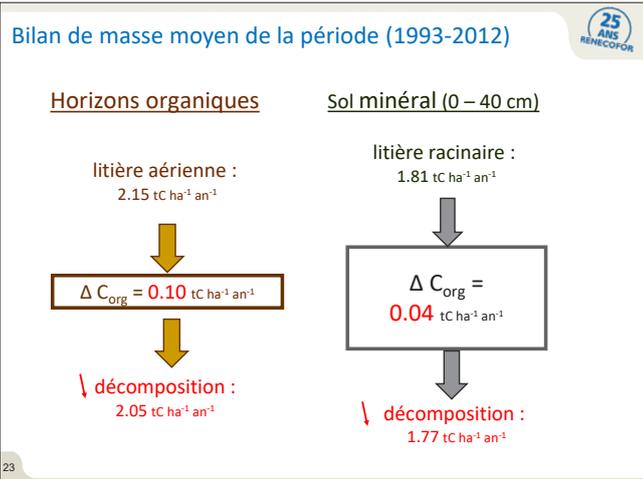
Sol minéral (0 – 40 cm)

litière racinaire :
1.81 tC ha⁻¹ an⁻¹

$\Delta C_{org} = 0$

Décomposition :
1.81 tC ha⁻¹ an⁻¹

25 ANS
RENECOFOR



Puis nous avons essayé de voir comment ces flux ont évolué au cours du temps, s'ils ont évolué au cours de la période d'observation. Pour les litières aériennes, nous n'avons pas détecté de tendance dans les mesures du réseau RENECOFOR, donc nous n'avons pas considéré de tendance à ce niveau-là et nous en avons déduit, par hypothèse, qu'il n'y avait pas non plus de tendance au niveau des litières racinaires.

Mais en ce qui concerne les pertes par décomposition, comme la qualité de la litière s'était dégradée, notamment au niveau du rapport C/N (diminution relative de la teneur en azote), nous avons estimé, sur la base de modèles relativement simples une réduction plausible de la vitesse de décomposition. Finalement, nous obtenons par cette méthode un taux de séquestration pour les horizons organiques qui est du même ordre de grandeur que ce qu'on observe (environ 0,1 tC/ha/an).

Par contre, en ce qui concerne le sol minéral, cette approche de bilan de masse conduit à une estimation de séquestration du C nettement inférieure à ce qui est observé.

Ça nous a donc conduits à remettre en question notre hypothèse de base sur le fait que les sols étaient à l'état stationnaire à la première campagne. Du coup, on explique plutôt la séquestration de carbone comme résultant d'un déséquilibre préexistant entre les apports de litière et la décomposition. Et cette explication est bien corroborée par la diminution du taux de séquestration du carbone avec l'âge puisque, pour les peuplements les plus âgés on s'approche de plus en plus de l'état d'équilibre.

Conclusion

En conclusion, les données du réseau ont permis de répondre au moins partiellement à une question d'actualité en ce qui concerne le cycle du carbone. Les écosystèmes forestiers agissent-ils comme des puits de carbone ? Pour moi la réponse est oui. Et quel est l'ordre de grandeur ? C'est l'ordre de grandeur du 4 pour 1000.

Par ailleurs cette étude a permis de formuler des hypothèses, et c'est là pour moi un des grands intérêts du réseau : il permet aux chercheurs de se poser les bonnes questions. Les hypothèses ici sont relatives à l'effet de l'âge, de l'essence, de la structure du peuplement et tous ces effets devront être vérifiés et testés de manière plus approfondie dans des dispositifs de recherche en conditions contrôlées. Mais il reste aussi des questions : les tendances vont-elles se poursuivre à long terme, quelle est la stabilité du carbone nouvellement accumulé ?

Pour finir je dirai que les données du réseau RENECOFOR m'ont apporté beaucoup, m'ont permis de faire de nombreux travaux de recherche, et je vous en suis très reconnaissant à vous qui avez collecté les données jour après jour. Merci aussi à Erwin Ulrich et à Manuel Nicolas de m'avoir donné l'opportunité de traiter ces jeux de données très précieux et de grande qualité. Je compte bien les utiliser encore à l'avenir, notamment dans des recherches de modélisation mécaniste, parce que je considère que les placettes du réseau sont idéales pour la validation des modèles et l'analyse de simulations sur des cas d'étude bien particuliers.

Merci pour votre attention.