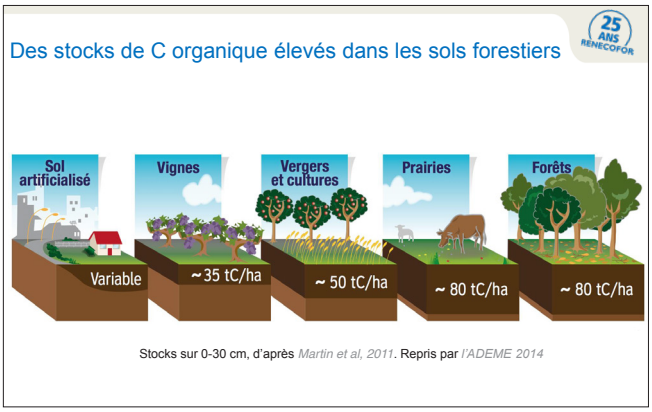
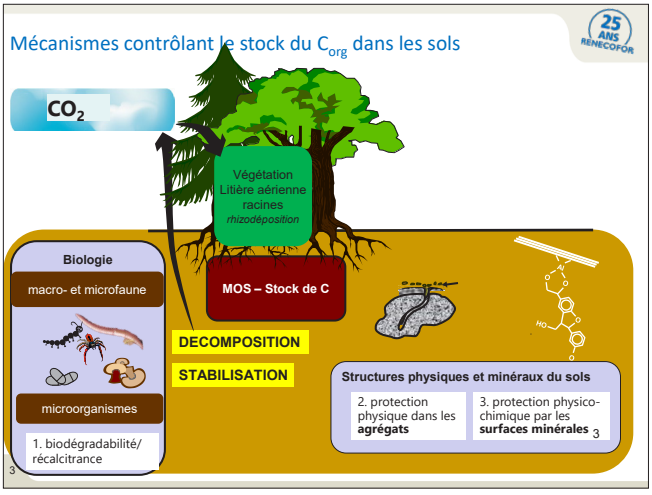
COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DES MATIÈRES ORGANIQUES DES SOLS, UN COMPARTIMENT-CLÉ DANS L'ÉQUILIBRE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Delphine Derrien
INRA, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers





L'exposé que je vais vous présenter résulte en grande partie des travaux conduits par le « collectif CarboSMS » (Carbone des Sols, Mécanismes de Stabilisation). C'est un collectif de chercheurs qui s'est structuré à l'occasion de l'initiative 4 pour 1000 et qui s'intéresse à l'explicitation des mécanismes de dynamique du carbone dans les sols.

Je vais d'abord rapporter l'état actuel des connaissances sur les mécanismes de dynamique des matières organiques dans les sols, plus précisément dans les sols forestiers. Puis je vais essayer de voir avec vous comment les pratiques de gestion peuvent impacter ce stock de carbone dans les sols, si on peut l'augmenter tel que le prône l'initiative 4 pour 1000. Nous verrons ensuite comment on peut essayer de prédire les évolutions des stocks de carbone, notamment en s'appuyant sur les données du réseau RENECOFOR.

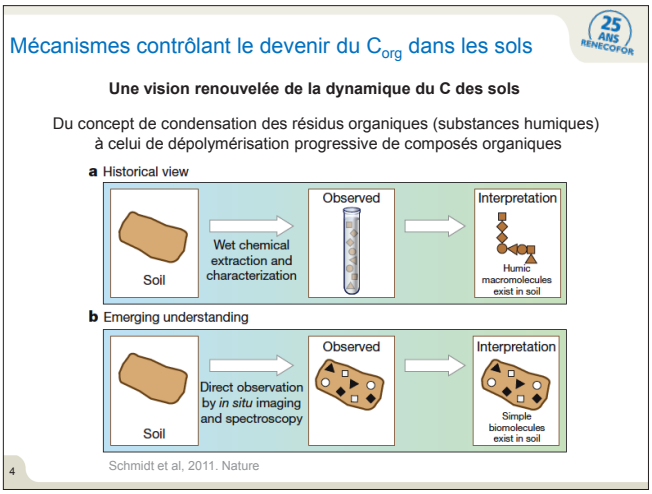
Les sols forestiers stockent environ 80 tonnes de carbone par hectare dans leurs 30 premiers centimètres, ceci pour les territoires métropolitains. À ces 80 tC/ha s'ajoutent environ 10 tC/ha dans la couche organique de surface, que vous appelez peut-être humus, ou couche de litière… Les prairies stockent à peu près la même chose dans leur sol et vous pouvez remarquer que les sols agricoles, eux, stockent beaucoup moins, de l'ordre de 50 tC/ha.

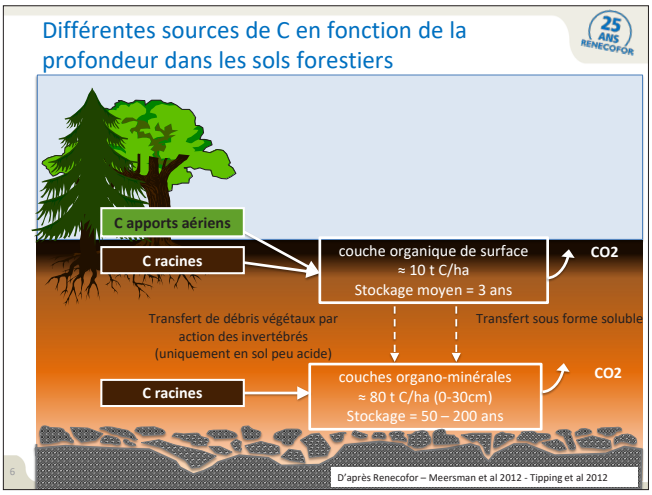
Voyons quelles sont les sources du carbone des sols et ce qui arrive à ce carbone qui entre dans les sols.

Les mécanismes de la dynamique du carbone dans les sols

Le carbone entre dans les sols par apport de litière, litière aérienne mais aussi souterraine, c'est-à-dire les racines fines qui meurent et les exsudats racinaires.
Ce carbone d'origine végétale est utilisé par les organismes vivants du sol qui le transforment pour produire du CO_2 ou pour créer leurs propres métabolites. Les résidus végétaux, les métabolites des microorganismes vivants peuvent ensuite potentiellement être stabilisés dans les sols par interaction avec les structures minérales : ils sont encapsulés dans des agrégats ou bien ils peuvent être sorbés sur les surfaces minérales.

Notez que je n'ai pas parlé pas d'un processus de décomposition des matières organiques du sol qui s'appelait, qui s'appelle toujours, l'humification. C'est un concept qui a eu beaucoup de succès pendant des décennies : il considérait que les fragments en cours de décomposition s'assemblaient pour former de grosses molécules denses, les substances humiques, qu'on pouvait d'ailleurs extraire par des extractions séquentielles dans des milieux acides puis basiques. On appelait ça les acides fulviques, les acides humiques et les humines.





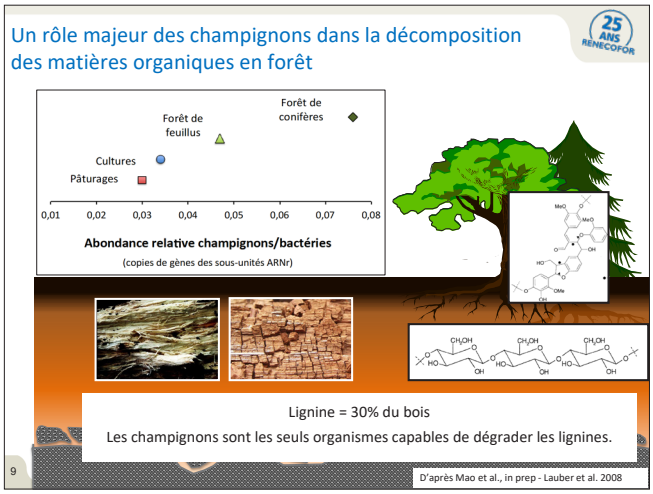
Les progrès analytiques d'observation des matières humiques ont permis de démontrer que ce concept d'humification était faux, que ces grosses molécules condensées qu'on pensait voir par extraction dans les acides et les bases étaient créées artificiellement en raison de la force ionique de ces acides et de ces bases. En fait, ce sont des petits composés en cours de décomposition qui formaient des assemblages supramoléculaires, mais de façon artificielle. Aujourd'hui, ce concept d'humification est révolu et on sait que la matière organique se dépolymérise au cours du temps.

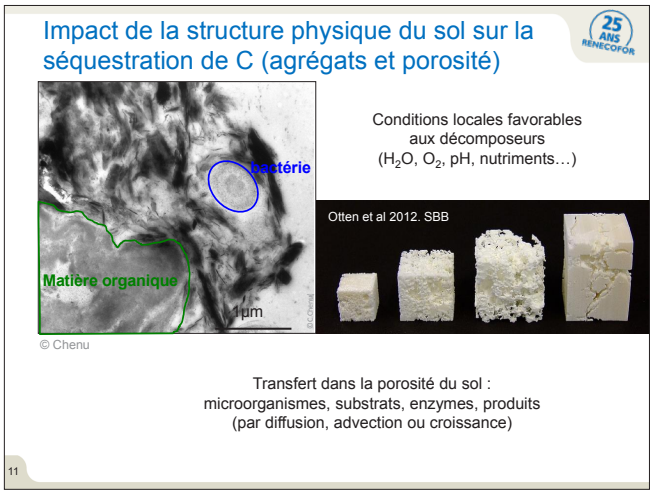
Revenons-en aux différents processus, et intéressons-nous d'abord aux **entrées de carbone dans les sols forestiers.**

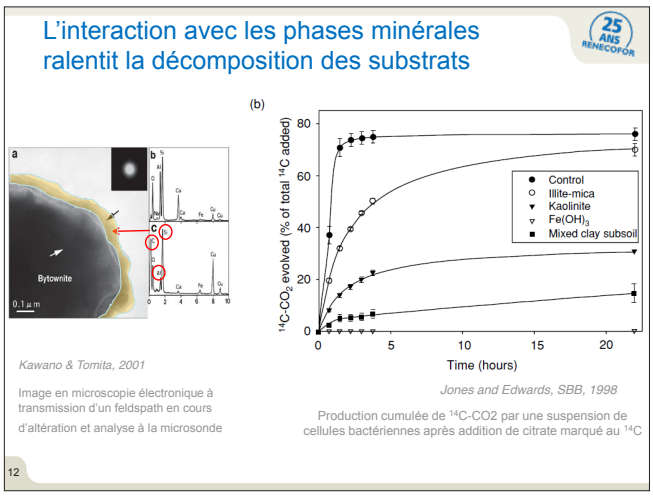
Les sols forestiers sont structurés en horizons, en raison du non travail du sol. **La couche organique de surface** a pour sources les apports aériens des litières mais aussi des apports racinaires parce qu'il y a aussi des racines dans cette couche. Elle contient environ 10 tC/ha, avec de très fortes variations, et le stockage y est en moyenne de l'ordre de 3 ans. Bien entendu, c'est très variable, ça dépend des organes végétaux qui sont dedans : une feuille va se décomposer plus vite qu'une branche, par exemple.
Dans **la couche du sol minéral,** les apports sont principalement des apports racinaires, mais il y a aussi des transferts verticaux depuis la couche de surface, soit sous forme soluble, soit en raison de transfert par la faune du sol si les conditions du sol, le pH, permettent l'existence de ces organismes fouisseurs. Les horizons profonds contiennent environ 80 tC/ha, et il faut remarquer que la durée de stockage y est de l'ordre de 50 à 200 ans. Donc les processus de renouvellement des stocks de carbone sont extrêmement lents.
Ici je rebondis sur le commentaire de Mathieu Jonard, qui disait qu'on n'est peut-être pas encore à l'équilibre dans les placettes résineuses afforestées récemment : si elles étaient auparavant sous culture, avec seulement 50 tC/ha, il faut plus de 100 ans pour arriver au stock à l'équilibre de 80 tC/ha sous forêt. Donc en effet, on n'est peut-être pas encore à l'état d'équilibre.

Intéressons-nous maintenant au **rôle des organismes vivants**, comment ils vont modifier les matières organiques et impacter le stock de carbone.

Je vais parler en premier lieu de **la faune du sol**, qui a deux actions antagonistes. D'un côté, elle favorise la minéralisation des matières organiques dans le sol, par fragmentation des débris végétaux et aussi par le passage dans le tube digestif : il y a mise en contact avec des enzymes et des bactéries, et donc dépolymérisation et minéralisation des produits organiques. Mais en parallèle, la faune du sol inclut les débris végétaux dans des structures biogéniques et ça produit des agrégats qui vont protéger les débris organiques de l'action des décomposeurs. Quant à la faune fouisseuse, elle enfouit les matières organiques en profondeur ; or on sait qu'en profondeur les conditions deviennent défavorables à la décomposition. Enfin, les organismes vivants synthétisent leurs propres métabolites et la structure chimique des molécules ainsi produites est différente de celle des composés végétaux ; cela favorise la rétention de ces molécules sur les surfaces minérales, et elles sont donc globalement plus stabilisées.



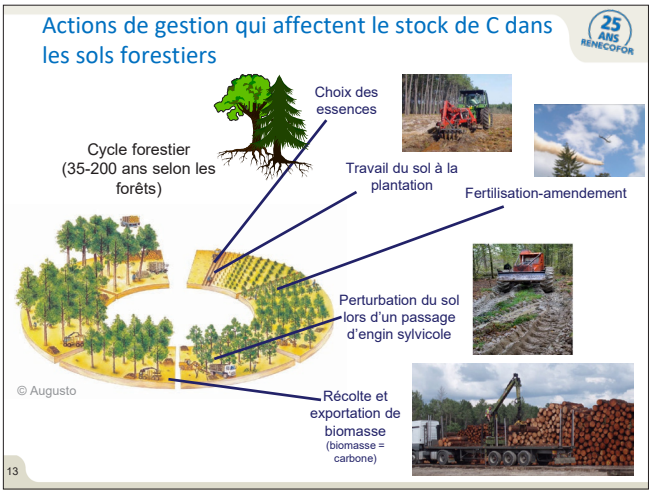


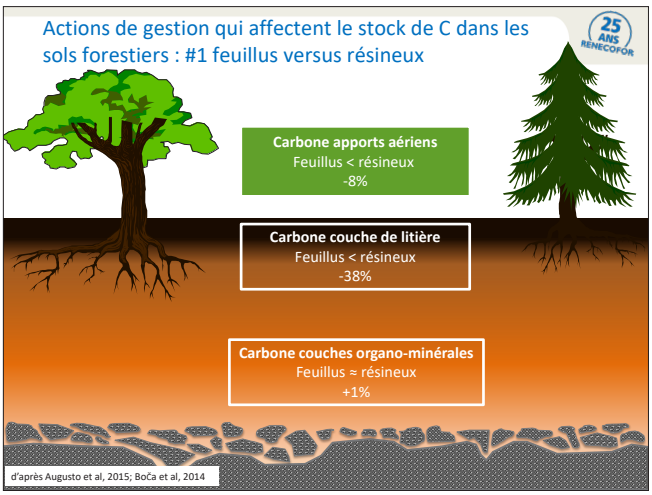


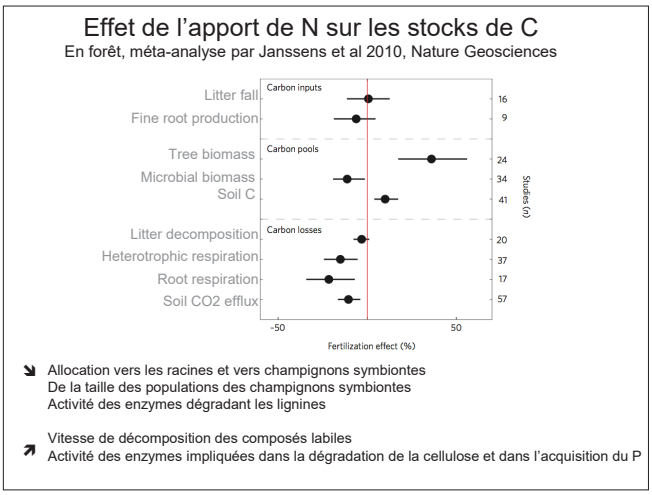
Outre la faune du sol, les autres organismes très importants dans la décomposition des matières organiques sont les **micro-organismes**. Le graphique en haut montre l'abondance relative des champignons par rapport aux bactéries sous différents usages. On remarque que dans les sols forestiers l'abondance relative des champignons est plus forte que dans les sols de cultures ou pâturages, et qu'elle est plus prononcée encore sous les forêts de conifères que sous les forêts de feuillus.
C'est que les champignons ont une spécificité qui concerne les apports végétaux. En forêt, les apports végétaux sont constitués à 30% de lignine, une molécule relativement dense, composée de cycles aromatiques avec beaucoup de types de liaisons chimiques différentes. Pour la décomposer, un organisme doit avoir beaucoup d'outils (d'enzymes) très différents. *A contrario*, la cellulose, qui est le composé majoritaire des feuilles et qu'on trouve également dans les systèmes agricoles, est un motif répétitif d'une structure simple (le glucose) : il suffit d'une ou deux enzymes, pour la décomposer. C'est donc beaucoup plus facile à dégrader que la lignine. Mais il se trouve que les champignons sont parmi les rares organismes à pouvoir décomposer la lignine. Et finalement, bien que les apports de lignine soient très importants en forêt, on n'a pas plus de lignine dans les sols forestiers que dans les sols agricoles.

Par ailleurs, **les structures physiques du sol** ont un rôle dans la protection des matières organiques et dans la genèse d'un stock important de carbone dans les sols. En, fait la structure physique du sol va conditionner l'activité des micro-organismes.
L'activité des décomposeurs s'exerce dans des conditions optimales de pH, de température, de disponibilité en eau et bien sûr de disponibilité en nutriments. Encore faut-il qu'il puisse y avoir un contact direct entre les décomposeurs (ou leurs enzymes) et la matière organique : vous voyez sur l'image de gauche une bactérie qui ne peut pas accéder à la matière organique quand bien même les conditions seraient favorables à son activité, parce que des argiles font écran. Il faut qu'il y ait dans le sol une porosité qui permette les interactions entre la matière organique et le décomposeur. Les outils type scanner médical permettent aujourd'hui de représenter le réseau de porosité d'un sol, puis d'en faire une impression 3D, comme on en voit sur l'image de droite. À cette échelle des agrégats, du micromètre, on se rend bien compte que certains sols sont plus poreux que d'autres.

À une autre échelle, inférieure au micromètre, les surfaces minérales ralentissent la décomposition des matières organiques. À droite, vous avez le résultat d'une expérience qui consiste à ajouter un composé organique très simple, du citrate, dans une suspension de bactéries et à mesurer au fil du temps la production de CO_2 correspondant à la décomposition du citrate ; et on répète l'opération en ajoutant à ce mélange différents types de minéraux. Vous voyez que la production de CO_2 par rapport au témoin (*control*) est ralentie par l'ajout des minéraux, à un degré qui dépend des types de minéraux. Je veux donc souligner ici l'importance des contextes pédoclimatiques : la minéralisation va être plus ou moins atténuée en fonction des différents minéraux. Comment ça marche ? Vous avez à gauche une particule minérale en cours d'altération et à sa surface (en marron), des composés organiques qui sont très fortement attachés. C'est là que se jouent les interactions et la protection des matières organiques ; les microorganismes ne peuvent pas, ou difficilement, attaquer cette matière organique sorbée.







Les actions de gestion qui affectent le stock de carbone des sols forestiers

Cette illustration passe en revue quelques actions de gestion qui peuvent affecter le stock de carbone dans les sols forestiers. Mais je vais m'intéresser plus particulièrement à l'impact du choix des essences et à celui de la fertilisation azotée. Je vous présente ici des données issues de compilations d'études.

Quel va être **l'impact du choix d'une essence feuillue ou résineuse** sur les stocks de carbone dans les sols ? Les apports de litière sont plus faibles sous feuillus en général que sous résineux (- 8%). Cela se traduit dans la couche de litière : le stock de carbone dans cette couche est également plus faible sous feuillus que sous résineux, et même beaucoup plus faible : on n'est plus à 8 % mais à 38% de différence. Ceci est lié aux conditions notamment de pH, qui sont souvent plus acides sous résineux et qui ralentissent l'activité des décomposeurs, et aussi à la qualité chimique des apports sous résineux : il y a des cires qui sont plus difficiles à décomposer et il y a plus de lignine.

Mais dans les horizons organo-minéraux du sol, les stocks sont relativement similaires sous résineux et sous feuillus : on n'a pas de propagation de cette différence avec la profondeur. C'est quelque chose qu'on ne sait pas encore vraiment expliquer ; il est possible que les organismes fouisseurs soient absents ou moins présents sous résineux parce que les sols sont plus acides.

En ce qui concerne **l'impact d'une fertilisation azotée** sur les stocks de carbone, on constate que dans des sols forestiers fertilisés, la biomasse (le carbone) de l'arbre augmente et le stock de carbone dans les sols augmente aussi. Comment expliquer ça ? Quand on fertilise (en azote), la production de racines a tendance à diminuer. L'arbre a moins besoin de produire des racines pour aller chercher les nutriments. Donc il y a moins de racines produites, moins d'apports de matière organique fraîche sous terre. De surcroît, quand il y a de l'azote disponible, l'arbre interagit moins avec les micro-organismes symbiontes pour aller chercher l'azote donc il y a moins de microbes et ces microbes en moindre nombre vont moins minéraliser la matière organique.

Globalement cette étude montre que la fertilisation azotée des sols forestiers a tendance à réduire la biomasse microbienne et donc à augmenter le stock de carbone dans les sols.

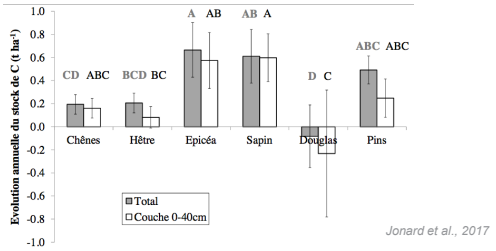
Comment prédire les évolutions de stock de C dans les sols ?

- Utiliser des indicateurs de dynamique du C dans les sols
- Utiliser des modèles de la dynamique du C dans les sols
- … mais indicateurs et modèles ne rendent pas souvent compte des mécanismes fins contrôlant la dynamique du C
- Disposer de réseaux d'observations pour comprendre quels mécanismes sont en jeu dans diverses situations pédoclimatiques

16

Le RENECOFOR: un dispositif permettant de suivre l'évolution du stock de C dans les sols sur le long terme

mesures de stock de C répétées à 15 ans d'intervalle sur les 102 placettes du réseau



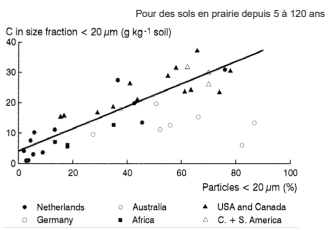
Jonard et al., 2017

- En moyenne augmentation du stock de C **de l'ordre de 4‰ !**
- Les sols sous résineux séquestrent davantage que les sols sous feuillus
- Effet de la durée depuis l'afforestation ?

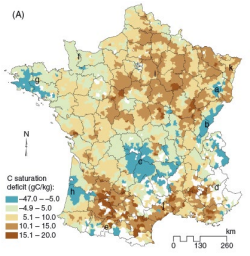
17

Un indicateur du potentiel additionnel de stockage de C

Le concept de saturation en C des sols



Hassink, 1997



Angers et al, 2011

C stable des fractions fines = 4,09 + 0,37 x (%particules fines)

voir également les travaux de Laure Soucémarianadin

18

Comment prédire les évolutions des stocks de carbone dans les sols ?

Nous avons des outils disponibles pour cela : utiliser des indicateurs qui vont prédire l'évolution, ou utiliser des modèles, comme Eric Dufrêne l'a montré. Mais pour pouvoir utiliser des indicateurs et des modèles il faut au préalable les valider. Vous avez eu une illustration des validations du modèle CASTANEA qui ont été faites sur le réseau RENECOFOR, moi je vais vous parler de travaux en cours qui utilisent ou ont utilisé les données RENECOFOR pour valider des indicateurs et modèles sur la dynamique du carbone dans les sols. Mais je vais surtout vous présenter des travaux en cours.

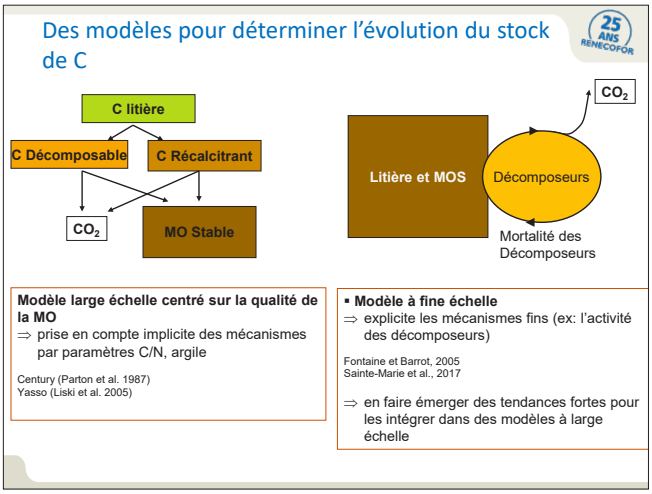
J'ai emprunté à Mathieu Jonard cette figure qui illustre l'apport du réseau d'observation RENECOFOR sur le stockage de carbone dans les sols forestiers, grâce aux mesures de stock répétées à 15 ans d'intervalle.

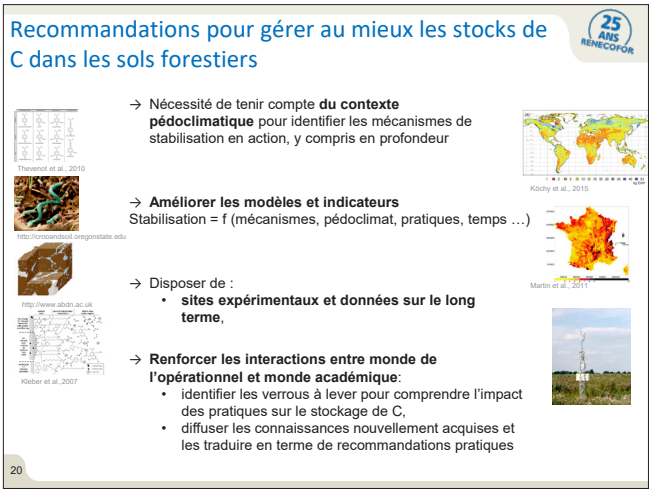
Elle montre en particulier que le stockage est plus fort sous les peuplements de résineux, à l'exception du Douglas, que sous feuillus, et je rappelle l'interprétation avancée : si on estime que nombre de placettes résineuses correspondent à d'anciennes terres de cultures afforestées plus récemment, on peut penser que, puisque le stock des sols agricoles est très inférieur à celui des sols forestiers, le stockage actuel est important parce qu'il faut du temps pour passer de l'un à l'autre et qu'on n'est pas encore à l'équilibre

Et j'en viens maintenant aux travaux en cours sur les données RENECOFOR pour chercher à prédire les évolutions de stock.

Voyons d'abord **l'indicateur des taux de saturation des sols en carbone.** Des chercheurs ont observé une relation linéaire (à gauche) entre la quantité de particules fines dans un sol et la quantité de carbone associée à ces particules fines, dans des sites considérés à l'état stable. Sur la base de cette observation, ils se sont dit qu'il devait y avoir une quantité maximale de carbone associée à ces particules fines, « protégée » par les mécanismes que j'ai expliqués précédemment. De cette droite, ils ont donc déduit une équation qui donne le stock maximal de carbone qui peut être protégé par les particules minérales. À l'échelle d'un territoire, comme ici à l'échelle de la France, on peut quantifier la proportion de particules fines des sols, regarder la concentration effective en carbone organique de la fraction fine du sol et voir si on est à la valeur maximale ou en-dessous. Si on est en-dessous, il y a un potentiel de stockage additionnel et on peut théoriquement stocker davantage en adoptant des pratiques vertueuses. Sur la carte, les zones à potentiel de stockage additionnel sont en marron, mais il y a aussi quelques secteurs en bleu qui seraient en surstockage… L'indicateur est un outil, ce n'est pas la vérité, ça ne marche pas toujours. Le réseau RENECOFOR va permettre de tester précisément la robustesse et l'utilité de l'indicateur.

À signaler aussi les travaux de Laure Soucémarianadin sur des indicateurs d'évaluation de la stabilité ou de la « décomposabilité » des stocks de carbone.





Par ailleurs nous avons des modèles pour déterminer l'évolution des stocks de carbone dans les sols. Des modèles à grande échelle qui ont été testés sur le réseau RENECOFOR et qui distinguent, parmi les processus que j'ai mentionnés, la matière organique en fonction de sa qualité : facilement décomposable ou pas. Mais ils n'utilisent pas vraiment les mécanismes : ils les prennent en compte de façon implicite avec des paramètres de type rapport C/N, ou rapport lignine/azote, et ils ont également des paramètres qui tiennent compte de la teneur en argile. Ce sont donc des modèles relativement limités au regard de l'état actuel des connaissances en termes de mécanismes.

À une échelle beaucoup plus fine, celle d'une placette du réseau RENECOFOR ou d'un horizon de sol dans les placettes, on peut développer des modèles qui intègrent les mécanismes ; des modèles qui, par exemple, explicitent la dynamique du carbone en fonction de l'activité des microorganismes du sol parce que ce sont eux, vraiment, qui gèrent la décomposition. Mais on ne peut pas appliquer ces modèles fins à une large échelle comme celle du territoire : ce serait beaucoup trop lourd. Notre démarche actuelle est donc de développer ces modèles, de les faire tourner pour essayer d'en tirer de grandes tendances qu'on pourra introduire dans les modèles précédents, plus faciles à mettre en œuvre à large échelle.

En conclusion

Je termine en vous donnant mon point de vue pour gérer au mieux les stocks de carbone dans les sols forestiers, essayer d'éviter de déstocker et, au mieux, stocker du carbone. Sur le réseau RENECOFOR on observe actuellement un stockage qui est de l'ordre de ce que le ministre a donné comme objectif. C'est parfait, tout va bien !

Plus sérieusement, mes recommandations, c'est d'abord, au vu de nos connaissances sur les mécanismes de séquestration du carbone dans les sols, de tenir compte du contexte pédologique y compris dans les horizons profonds. Parce que les minéraux, le pH, etc., tout ça joue sur la séquestration du carbone et l'activité du vivant. Ensuite, nous les scientifiques, nous devons travailler à améliorer nos modèles et indicateurs en tenant compte des mécanismes, du pédoclimat, des pratiques de gestion et, bien entendu, du temps parce que les processus à l'œuvre se déroulent sur de très longues durées. Vous avez vu qu'il y a encore du travail. Pour cela, nous avons besoin de sites expérimentaux générant des données sur le long terme, soit plusieurs décennies (un siècle idéalement) ; nous devons aussi renforcer les interactions entre personnes de l'opérationnel et du monde académique, de façon à identifier les verrous pour comprendre l'impact des pratiques sur le stockage de carbone et réciproquement pour diffuser la connaissance et la traduire en recommandations pratiques.

À ce titre, je trouve que ce qui se fait au niveau du réseau RENECOFOR satisfait à toutes ces recommandations de par le design du dispositif, qui couvre une large gamme de contextes pédoclimatiques en France, de par la qualité des résultats que vous collectez sur le terrain, de par les travaux scientifiques qui y sont menés et de par l'animation telle qu'elle est faite aujourd'hui, qui nous permet de nous rencontrer et d'échanger.

Merci pour votre attention.