



Résumé à l'intention des groupes cibles

Numéro de projet

406840_143023

Titre

Indicateurs de la vulnérabilité du carbone contenu dans les sols

Responsable de projet

Timothy Eglinton, EPF Zurich

Contribution à la synthèse thématique :

<input type="checkbox"/> Sol et production alimentaire	<input checked="" type="checkbox"/> Sol et environnement	<input type="checkbox"/> Développement territorial	<input type="checkbox"/> Informations du sol, méthodes et instruments	<input type="checkbox"/> Vers une politique durable des sols
--	--	--	---	--

Lieu, date : Birmensdorf, le 7 avril 2017

Contexte

Pour mieux appréhender les changements climatiques en cours, il est primordial de comprendre la dynamique du cycle du carbone et la relation qu'elle entretient avec le climat de la planète. L'analyse précise des sources et des puits de carbone permet d'estimer avec une plus grande exactitude la vitesse des changements climatiques et de prévoir des mesures de protection ou d'adaptation correspondantes. Les sols contiennent environ deux fois plus de carbone que l'atmosphère (sous forme de CO₂) et forment ainsi le plus important réservoir terrestre de carbone organique. Au-delà de sa fonction de stockage du carbone, la matière organique du sol (MOS) joue également un rôle majeur dans les processus physico-chimiques pédologiques. Elle fait en effet office de réservoir pour les substances nutritives indispensables à la vie des écosystèmes du sol (plantes et microorganismes). En outre, la MOS participe au filtrage des eaux et à la rétention des polluants. Il n'existe à l'heure actuelle aucun consensus sur l'influence réelle que le changement climatique et la modification des pratiques d'utilisation du sol exerceront sur ces importants réservoirs de carbone. Compte tenu de la complexité du sujet et de la grande diversité des facteurs susceptibles d'influer sur la stabilité et la vulnérabilité de la matière organique du sol, il s'avère difficile de paramétrer ou de prévoir son comportement. L'acquisition de nouvelles connaissances sur la dynamique de la MOS permet d'accroître le savoir global sur la diversité de ses fonctions. La datation radiocarbone (14C) est une méthode de plus en plus utilisée dans le cadre des études menées sur la MOS, car sa fenêtre de temps allant de quelques décennies à quelques millénaires constitue un moyen efficace de déterminer la vitesse des processus liés à la dynamique du carbone. L'analyse scientifique de la MOS exige d'adopter une approche qui tienne compte de son caractère hétérogène et complexe et qui permette de prendre en considération plusieurs espaces géographiques et temporels illustrant à leur tour différents gradients climatiques et écologiques. La composition et le temps de résidence de la MOS sont déterminés au moyen de procédés complexes qui requièrent eux-mêmes que les différents mécanismes de stabilisation en lien avec des réservoirs de carbone spécifiques soient explorés.

But

Le projet « Indicateurs de vulnérabilité » visait à obtenir une meilleure compréhension de la dynamique de la MOS et de ses variations au sein de différents espaces géographiques et temporels de référence. Il s'agissait en outre d'identifier quels composants de la MOS présentaient la plus grande vulnérabilité ou stabilité face aux changements environnementaux. Dans ce contexte, différentes questions ont été soulevées :

1. Comment l'âge du carbone contenu dans le sol (datations radiocarbone) varie-t-il en fonction des zones géographiques, échelles temporelles et gradients climatiques et géologiques considérés ?
2. Comment les datations radiocarbone du sol se modifient-elles au cours du temps au sein de différents écosystèmes ? Quelles répercussions ces données ont-elles sur la stabilité et la dynamique du carbone du sol ?
3. Quel rôle la MOS joue-t-elle pour le stockage et les déperditions de carbone ? La MOS est-elle particulièrement sensible aux changements climatiques et à leur impact sur l'environnement ?
4. Quelles connaissances peut-on acquérir sur la stabilité et la vulnérabilité potentielle du carbone du sol à travers l'étude de composés spécifiques à une source (lipides végétaux) ?

Pour réaliser leurs travaux de recherche, les scientifiques se sont appuyés sur des échantillons anciennement ou nouvellement prélevés dans le cadre du programme de surveillance longue durée du groupe WSL « Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers » (LWF) et ont employé les toutes dernières méthodes d'analyse des laboratoires de l'EPPF. Les importantes variations climatiques et géologiques dont bénéficie naturellement la Suisse offraient un cadre idéal pour procéder à l'étude approfondie de toutes ces questions.

Résultats

Les enseignements majeurs que l'on peut tirer de ce projet se divisent en deux grandes catégories : (i) le comportement de la MOS soumise à différentes influences climatiques et diverses échéances temporelles (objectifs de recherche 1 et 2) ainsi que (ii) la dynamique de réservoirs de MOS spécifiques, vulnérables (composés organiques dissous) ou stables (lipides végétaux) (objectifs de recherche 3 et 4). Il a ainsi été constaté que les lipides végétaux pouvaient servir d'indicateurs (*sentinelles*) de stabilité ou de vulnérabilité de divers réservoirs de matière organique.

Gradients climatiques et géologiques

Variabilité géographique du carbone 14

L'ordre de grandeur et les facteurs de contrôle de la variabilité de la MOS (stocks, dynamique et flux) en lien avec différents espaces de référence n'étaient guère connus jusqu'ici. Nos résultats révèlent que les variations observées sur une parcelle, à l'échelle de plusieurs mètres, peuvent être très significatives, et qu'elles se vérifient également dans les mêmes proportions à l'échelle de plusieurs kilomètres sur différentes zones géographiques. A l'exception d'une faible corrélation constatée avec le niveau moyen des températures annuelles (MAT) et le niveau moyen des précipitations annuelles (MAP) (Figure 1), il ne paraît exister aucune corrélation directe entre les signatures radiocarbone (^{14}C) et les facteurs climatiques ou les paramètres liés à la structure du sol. La signature carbone des sols profonds est par ailleurs étonnamment homogène, même lorsque ceux-ci sont soumis à de fortes variations climatiques. Ces résultats confirment combien il est important de prélever des échantillons représentatifs (sur la base d'une grille d'analyse) qui permettent de tenir compte à très petite échelle de la variabilité du cycle du carbone dans le sol.

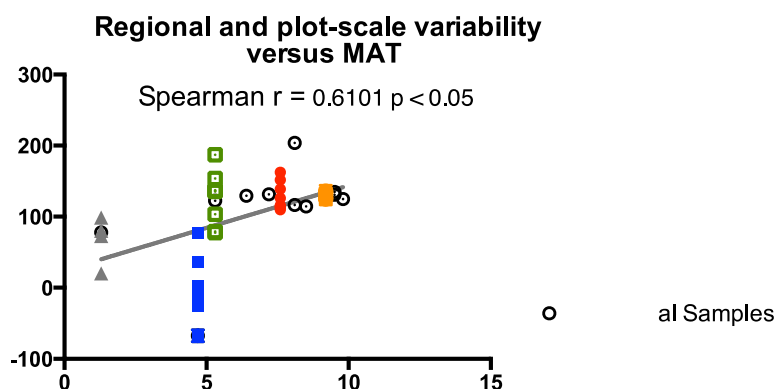


Figure 1. Variabilité au niveau parcellaire et régional. MAT : niveau moyen des températures annuelles (mean annual temperature) (°C). L'étude de la variabilité des échantillons individuels et mixtes au niveau parcellaire se traduit par des résultats comparables à ceux observés au niveau régional.

Analyse basée sur la datation radiocarbone de séries chronologiques de gradients au sein d'un écosystème forestier

Les mesures radiocarbone d'échantillons de sol menées dans les années 1990 et 2014 ont permis l'observation de variations du carbone 14 sur de courtes durées qui mettent plus précisément en lumière la dynamique du carbone (stocks, transformation, flux). Une approche de modélisation innovante a permis d'analyser la durée des cycles du carbone dans les couches supérieures et inférieures du sol pour différents écosystèmes – de tempéré à alpin. Les résultats ont révélé que ces durées s'avéraient plus importantes dans les sols non humides et que les flux de carbone chutaient de façon exponentielle dans tous les sols au fur et à mesure que la profondeur augmentait. Ces résultats laissent donc supposer que, bien qu'une part importante du carbone soit stockée dans les couches inférieures du sol, ces réserves profondes ne participent pas de manière significative au flux global du carbone. Les résultats des mesures n'ont également fait apparaître aucune corrélation directe entre le cycle (ou flux) du carbone et les facteurs environnementaux (niveau moyen des températures annuelles, précipitations annuelles, production primaire nette) ou la structure du sol. Il en découle que le cycle de la matière organique du sol n'est pas dominé par un facteur unique. La modélisation mathématique de profils carbone suggère que le substratum rocheux contribue de manière significative à la constitution des réserves profondes de carbone, ce qui atténue la frontière séparant les éléments actifs et inactifs (sédimentaires) du cycle du carbone.

Réserves de carbone et résistance en période de changement climatique global

Afin de mieux comprendre la dynamique et la vulnérabilité de différentes composantes du réservoir complexe que constitue la MOS, les scientifiques ont adopté une double approche : (i) analyse du carbone organique dissous (dissolved organic carbon, DOC) et (ii) étude de fractions de densité définies sur une base opérationnelle et de liaisons spécifiques (lipides) isolées de la MOS globale.

Le carbone organique dissous en tant qu'indicateur du réservoir de carbone dynamique et potentiellement vulnérable

Des échantillons prélevés sur deux sites suisses lors de la période de sécheresse de l'été 2015 ont mis en évidence des modifications de la concentration et des caractéristiques radiocarbone du carbone organique dissous (DOC), qui indiquent soit une perte nette de carbone stabilisé, soit une transformation de la source de carbone. Une recrudescence des périodes de sécheresse étant prévue à partir de la seconde moitié du 21^e siècle, ce processus pourrait potentiellement induire des déperditions accrues de carbone ancien (stabilisé). En outre, les mesures radiocarbone réalisées sur le DOC indiquent que celui-ci pourrait jouer un rôle clé dans les changements rapides s'opérant au sein des réservoirs de MOS (à l'horizon de quelques décennies). Enfin, les mesures radiocarbone révèlent une interaction continue entre la MOS globale que l'on peut trouver dans les couches profondes et le carbone organique dissous présent dans le profil complet du sol.

Les lipides végétaux hydrophobes en tant qu'indicateurs du réservoir de carbone immobile et potentiellement résistant

L'analyse radiocarbone de liaisons lipidiques spécifiques isolées du profil du sol a révélé que ces dernières sont des indicateurs du réservoir de carbone le plus stable qui est lié sous forme minérale et qui semble relativement insensible aux changements climatiques. La datation carbone 14 très dispersée des marqueurs lipidiques individuels indique par ailleurs que le spectre de la dynamique du carbone du réservoir de MOS s'exprime au niveau moléculaire. Enfin, les valeurs des mesures isotopiques réalisées sur des biomarqueurs révèlent que le carbone (géogène) du substratum rocheux contribue clairement à la MOS. De manière générale, l'analyse de liaisons organiques spécifiques améliore considérablement la connaissance que l'on peut avoir de la dynamique du carbone dans la MOS par rapport aux enseignements fournis par les fractions (par ex. de densité) définies sur une base opérationnelle et dont la fiabilité est perturbée par la variété des sources de carbone. Les liaisons organiques spécifiques (marqueurs lipidiques) sont donc désormais considérées comme de nouveaux indicateurs moléculaires de la stabilité de la MOS.

Implications pour la recherche

Contrôle des variables de la dynamique du carbone du sol

La combinaison de datations radiocarbone très poussées et de modélisations mathématiques des sols suisses offre un nouveau regard sur la dynamique du carbone en englobant une large fenêtre temporelle, de vastes espaces géographiques et une grande diversité de gradients écologiques. Les caractéristiques des zones étudiées (climat, structure du sol, minéralogie) fournissent de plus de nouvelles connaissances sur les facteurs qui accompagnent la transformation du carbone dans le sol. La MOS présente la même variabilité à l'échelle (restreinte) d'une parcelle qu'à l'échelle d'une région et dans les mêmes proportions. La température n'influence que faiblement la dynamique du carbone dans les couches supérieures du sol. A l'inverse, la structure des couches inférieures du sol, ainsi que les précipitations, constituent des facteurs d'influence majeurs. La datation radiocarbone des couches supérieures et inférieures du sol de plusieurs sites forestiers a permis de recueillir une quantité importante de données qui pourront servir de base à des études ultérieures de la variabilité spatiale et temporelle de la MOS présente dans les sols suisses. En dépit de contextes environnementaux très divers, les résultats obtenus quant à la dynamique du carbone dans les sols non humides présentent de grandes similitudes. Il a également été démontré que les couches inférieures du sol stockaient du carbone ancien et actuellement stable.

Des réservoirs de carbone vulnérables et difficilement dégradables dans un contexte de profondes mutations climatiques et écologiques

Le carbone organique dissous (DOC) constitue l'un des réservoirs de MOS les plus dynamiques et présente donc un grand intérêt pour l'étude de la composition du sol, de la transformation du carbone dans le sol et des effets induits par les changements climatiques. Un volet du présent projet était consacré à l'élaboration d'une nouvelle série chronologique basée sur la datation carbone du DOC pendant un été de sécheresse. Conséquence directe du réchauffement climatique, il faut s'attendre à ce que les périodes de sécheresse se multiplient en Suisse et dans le reste du monde. Il est donc essentiel de parvenir à une meilleure compréhension de l'impact de la sécheresse sur la dynamique du carbone du sol. Les résultats de cette étude suggèrent fortement que l'âge du DOC tend à augmenter, état de fait qui implique à son tour, qu'une réserve de carbone plus ancienne a été déstabilisée par la sécheresse. La perte de carbone par transfert dans le DOC constitue ainsi un indicateur du bilan carbone du sol en période de changement climatique.

A l'inverse du DOC, les liaisons lipidiques végétales forment la partie très stable du carbone du sol, ce qui est dû à leurs propriétés hydrophobes et aux liaisons qu'elles entretiennent avec les surfaces minérales. Les fractions (de densité) définies sur une base opérationnelle constituent la procédure traditionnellement utilisée pour classer en sous-groupes les réserves de carbone présentes dans le sol. Cette méthode se heurte cependant certaines limites. Nos résultats de recherche basés sur la mesure radiocarbone des liaisons lipidiques spécifiques du sol révèlent que les lipides constituent des indicateurs beaucoup plus efficaces des différents réservoirs de carbone pouvant exister dans un sol donné et intègrent par ailleurs un large spectre de durées du cycle du carbone. Les lipides végétaux semblent en particulier constituer des indicateurs fiables de la MOS la moins vulnérable – autrement dit la plus stable – et peuvent donc servir à mettre en évidence les réservoirs de carbone affichant une grande stabilité.

Implications pour la pratique

Ce projet de recherche a été élaboré dans le but d'aboutir à une meilleure compréhension des facteurs fondamentaux de la dynamique du carbone dans les sols suisses. Les résultats de nos travaux de recherche fondamentale, s'ils ne sont pas directement transposables dans la pratique quotidienne, contribuent toutefois dans une large mesure à mieux appréhender dans leur ensemble les phénomènes de diminution potentielle des réserves de carbone et la manière dont cette déperdition pourrait être atténuée à long terme par une modification des méthodes d'exploitation des surfaces, en réponse aux changements climatiques et environnementaux. Les résultats de cette étude intègrent des implications concrètes pour les utilisateurs et les différentes parties prenantes :

1. Au sujet des réserves de carbone suisses
Les couches supérieures et inférieures du sol des forêts suisses constituent d'importants réservoirs de carbone. Ce stock de carbone témoigne à l'heure actuelle d'une grande stabilité qui pourrait toutefois s'amenuiser à l'avenir sous l'action d'éventuelles perturbations (sécheresse). La quantité et la stabilité des stocks de carbone dépendent fortement du niveau des précipitations ou du taux d'humidité du sol. Il convient donc d'empêcher l'assèchement des sols forestiers.
2. Au sujet des extrapolations de l'inventaire du carbone du sol

L'homogénéité inattendue de la dynamique du carbone constatée dans les couches inférieures et supérieures des sols non humides induit une possible extrapolation à large échelle des paramètres de modélisation du carbone du sol.

3. Carbone fossile en tant que source complémentaire de carbone et inventaire du carbone du sol

Lors du calcul des sources de carbone existant aujourd'hui dans les sols suisses, il a non seulement été tenu compte de la végétation mais aussi du substratum rocheux situé au-dessous. La part relative de ces entrées, calculée par datation carbone, se répercute sur le cycle du carbone du fait de la métabolisation du carbone fossile (autrefois stable) qui constitue une source de carbone supplémentaire une fois libéré dans l'atmosphère. A l'heure actuelle, ces stocks de carbone fossiles ne sont pas pris en compte dans les modélisations du cycle du carbone (modèle de Yasso par exemple).

Recommandations

1. Stocks de carbone

Les importants stocks de carbone des sols suisses présentent une vulnérabilité aux variations hydrologiques. Il conviendra donc tout particulièrement d'éviter les mesures d'assèchement des sols humides.

2. Zones d'activité agricole

Le projet de recherche décrit ici est lié aux zones de forêts et apporte de nouvelles connaissances sur la stabilité du carbone du sol des écosystèmes forestiers. Toutefois, étant donné que de vastes surfaces du territoire suisse sont dédiées à l'exploitation agricole, une démarche similaire – comprenant également l'analyse des réserves de carbone spécifiques à l'échelle moléculaire – pourrait être adoptée pour les terres cultivées ou les zones de pâturage.

3. Atouts et potentiels de la surveillance à long terme

Les programmes de surveillance écologique à long terme (sur les sites WSL) permettent d'étudier la vulnérabilité et la stabilité du sol dans des conditions que les expériences de courte durée menées en laboratoire ne peuvent offrir. Compte tenu des changements climatiques qui se profilent à l'échelle régionale et planétaire, il est primordial d'assurer le maintien de ces programmes sur le long terme. Il y a tout lieu de penser que ceux-ci induiront des effets positifs pour la recherche et pour la science et contribueront à optimiser l'utilisation des ressources naturelles (nationales), ce qui s'avérera profitable pour l'ensemble de la population suisse.