



## Résumé analytique à l'intention des groupes cibles

Numéro de projet

406840\_143025

Titre

Stocks de carbone dans les sols forestiers suisses

Responsable du projet:

Frank Hagedorn, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Autres responsables du projet

Urs Gimmi, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL  
Esther Thürig, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL  
Lorenz Walthert, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Contribution à la synthèse thématique :

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

Lieu et date : Birmensdorf, le 18 mars 2017

## Contexte

La matière organique du sol (MOS) englobe la totalité des composés du sol d'origine biologique contenant du carbone. Elle constitue le plus important réservoir de carbone parmi les écosystèmes terrestres. Dans leur globalité, les sols contiennent environ trois fois plus de carbone organique (C) que la biomasse, et que l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub>. De plus, la MOS joue un rôle clé pour la majorité des propriétés et des fonctions des sols. Elle influe notamment sur la disponibilité en nutriments, le stockage de l'eau, l'effet de filtre et de tampon pour les polluants, la stabilité des sols ainsi que sur la diversité microbienne. C'est la raison pour laquelle une meilleure connaissance de la MOS permet également d'évaluer les multiples fonctions que remplit le sol dans l'environnement.

La matière organique du sol est très sensible aux modifications de l'environnement, puisqu'elle absorbe le carbone amené par la litière et qu'elle le libère à nouveau lors de la décomposition de l'humus. L'utilisation du sol et le changement climatique, qui influent sur la production végétale et sur les conditions microclimatiques, ont donc des répercussions sur la matière organique et les fonctions du sol. Certains processus de la dynamique du carbone du sol ont déjà été bien étudiés expérimentalement. Il demeure toutefois de grandes lacunes concernant la quantification et la modélisation des effets du climat, de l'utilisation du sol ainsi que de ses propriétés physico-chimiques sur le stockage de la matière organique. Ces lacunes compliquent la transmission des connaissances à plus grande échelle et les prédictions de l'évolution future.

## But

Le but principal du projet « Sols forestiers » était d'identifier les facteurs influençant les stocks de MOS dans les forêts suisses, et de répondre aux questions suivantes :

1. Combien de carbone est-il stocké par les sols des forêts suisses, et sous quelle forme?
2. Quels sont les facteurs d'influence les plus importants (climat, type de forêt, propriété physico-chimiques des sols)?
3. Quelle est l'influence de l'utilisation passée du sol et de l'évolution du couvert forestier sur les stocks actuels de carbone dans les forêts suisses?
4. Dans quelle mesure les stocks de carbone peuvent-ils être prédits avec fiabilité par la modélisation appliquée pour l'Inventaire des gaz à effet de serre en Suisse ? Quels sont les facteurs principaux de divergence par rapport aux stocks mesurés ?

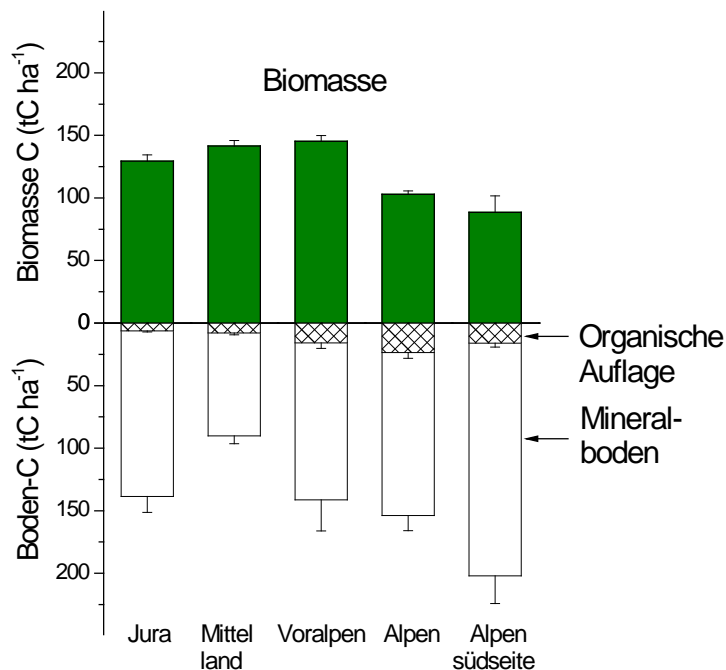
L'approche centrale du projet était d'analyser statistiquement la vaste base de données pédologiques de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), qui contient des données sur les concentrations et les stocks de carbone ainsi que des informations sur les conditions climatiques, la topographie, la végétation et les propriétés physico-chimiques de plus de 1000 profils de sols des forêts suisses.

## Résultats

### *Le stockage de carbone et ses facteurs déterminants*

Les forêts suisses stockent en moyenne 143 tonnes de carbone par hectare, c'est-à-dire environ 20% de plus que n'en contient la biomasse. Les sols forestiers de Suisse disposent ainsi de stocks de carbone légèrement supérieurs à ceux des pays d'Europe centrale voisins. Ce sont les sols du sud des Alpes qui en contiennent les quantités les plus élevées. Les forêts de conifères

emmagasinent dans l'horizon humifère nettement plus de carbone que les forêts de feuillus ( $38.0 \pm 2.4$  t C/ha contre  $10.1 \pm 0.7$  t C/ha). Dans les horizons minéraux, les stocks sont comparables dans les deux types de forêts. Au niveau national, les sols stockent environ sept fois plus de carbone que ne le fait l'atmosphère sous forme de  $\text{CO}_2$ .



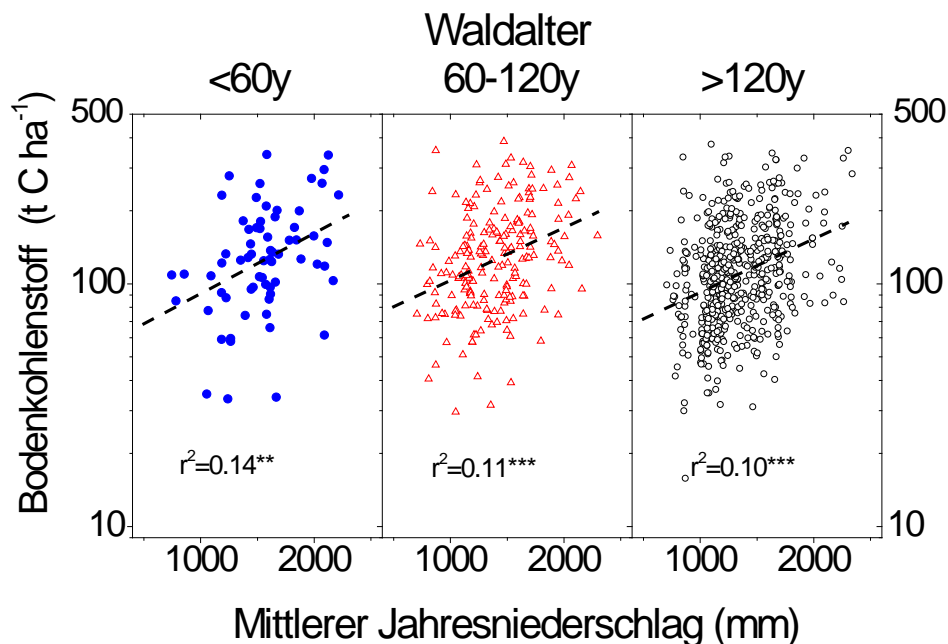
**Illustration 1.** Biomasse et stocks de carbone du sol dans l'horizon humifère ainsi que dans les horizons minéraux de Suisse.

L'analyse statistique des 1000 profils de sols par une sélection de paramètres suivie d'une analyse de variance a montré que les propriétés physiques et chimiques du sol exercent une influence dominante sur le stockage du carbone dans les sols forestiers de Suisse. Des taux de fer échangeable et d'argile élevés sont liés à des stocks globaux plus importants. Le deuxième facteur décisif est le volume de précipitations : plus il est élevé, plus les stocks sont conséquents. Les températures annuelles moyennes influent en revanche peu sur la MOS, peut-être parce qu'elles sont influencées par le facteur des précipitations. De même, la biomasse forestière et son taux de croissance n'ont pas d'effet direct sur les stocks de carbone dans les sols. Les stocks les plus importants ne se trouvent pas dans les régions les plus productives et à forte biomasse comme dans le Plateau, mais dans les Alpes et au sud des Alpes, c'est-à-dire les régions où la biomasse est la plus faible (ill. 1). Nous pouvons en conclure que les facteurs qui sont favorables à la croissance de la forêt - comme un climat chaud - sont aussi bénéfiques à la décomposition du carbone dans le sol. Certaines propriétés du sol, comme les oxydes de fer ou la teneur en argile, qui stabilisent l'humus, sont en outre plus importantes dans le stockage du carbone que la quantité de litière apportée, qui est corrélée à la biomasse et à sa croissance.

#### *L'évolution de la couverture forestière n'a que peu de conséquences*

La superficie forestière en Suisse s'est accrue de près de 22% au cours des 100 dernières années. Nous avons reconstitué à l'aide de cartes historiques numérisées l'évolution de la couverture forestière de 850 sites sur les 150 dernières années. L'analyse n'a révélé qu'une corrélation négative faible entre l'âge de la forêt et le stockage de carbone dans les sols. D'autres facteurs, en particulier la chimie des sols et le climat (ill. 2), exercent davantage d'influence sur le stockage du carbone.

Parmi les causes possibles de cette influence étonnamment faible de l'âge de la forêt sur les stocks de carbone, on peut citer l'utilisation antérieure de la majorité des sites étudiés comme prairies ou pâturages. Dans ces milieux, l'apport de carbone dans le sol par les racines est plus élevé qu'en forêt, et de plus, la stratification naturelle du sol n'est pas perturbée comme elle l'est par le labour dans un champ.



**Illustration 2 :** Avec des précipitations annuelles plus élevées, le stockage du carbone dans les forêts suisses est plus important, indépendamment de la longévité du boisement.

#### *La modélisation sous-évalue les stocks de carbone*

Etant donné l'importance des stocks, leurs faibles taux de variation et une grande hétérogénéité spatiale, les changements dans le stockage du carbone sont difficiles à déceler. Pour cette raison, ces changements sont souvent modélisés. Le modèle de carbone YASSO est ainsi utilisé pour l'Inventaire suisse des gaz à effet de serre également. Il modélise l'humus comme une fonction de l'apport de litière et du climat ; il est facile de le coupler à un modèle de croissance forestière.

Nos résultats montrent que YASSO reflète bien les stocks de carbone sur le Plateau, dans les Préalpes et dans les Alpes, mais qu'il sous-évalue en revanche le stockage dans le Jura et au sud des Alpes. L'analyse statistique des écarts entre stocks modélisés et stocks mesurés indique une sous-évaluation lorsque les taux de fer échangeable (sud des Alpes) et les taux de calcium (Jura) sont élevés. Les deux ions métalliques permettent à l'humus de se stabiliser, processus dont la modélisation ne tient pas compte. Par ailleurs, le modèle sous-évalue également les stocks de carbone en présence de précipitations abondantes et dans les sols saturés en eau.

Cette analyse des écarts tend à confirmer que les processus de stabilisation apportent une contribution importante au stockage de la MOS au niveau national. A cet égard aussi, le régime hydrique des sols joue un rôle plus important que la température. Le lien positif entre précipitations et stocks de carbone implique que la sécheresse croissante entraînera une baisse des stocks.

## **Implications pour la recherche**

### *Facteurs de stockage du carbone et modélisation*

Nos résultats prouvent que la stabilisation par les minéraux du sol (oxydes de fer) et les teneurs en argile sont les facteurs exerçant la plus grande influence sur les stocks de substance organique dans les sols des forêts suisses. Ce phénomène n'était connu jusqu'à présent que par des profils de sols isolés et des expériences de laboratoire. Le projet « Sols forestiers » nous a permis de mettre en lumière ce phénomène pour la Suisse sur un grand jeu de données récolté le long d'un gradient écologique marqué au niveau national. Les paramètres de stabilisation de l'humus expliquent aussi une grande partie des écarts entre stocks de carbone mesurés et stocks de carbones modélisés avec le modèle YASSO. Comme ce modèle n'est basé que sur l'apport de litière et sur le climat, il faudrait y intégrer des processus de stabilisation. Il faut toutefois, pour cela, prendre en compte des variables qui puissent être mesurées pour de grands jeux de données. Coupler YASSO à un modèle de bilan hydrique permettrait aussi de refléter plus fidèlement une possible inhibition de la dégradation du carbone lorsque la teneur en eau est élevée, et ainsi de prévoir les effets de la sécheresse de plus en plus courante à laquelle il faut s'attendre.

### *Conséquence de l'évolution de la couverture forestière*

L'influence négligeable de l'âge de la forêt sur les stocks de carbone, tant au plan national que régional, est une découverte. Des études de cas de prairies ou pâturages reboisés ont aussi montré des variations insignifiantes, équivalentes par comparaison, alors que dans les anciens champs, les stocks de carbone augmentent avec le reboisement. Dans l'espace alpin, la surface forestière progresse toutefois principalement dans les zones de pâturage. Les stocks mesurés dans les sols forestiers sont nettement supérieurs aux données publiées jusqu'à présent concernant les prairies et pâturages, sachant en outre que les sols de jeunes forêts présentent des réserves de carbone un peu plus élevées que ceux des forêts anciennes. On ne sait pas si les faibles valeurs de stockage du carbone affichées par les sols des milieux prairiaux sont la conséquence du fait que nombre de ces surfaces étaient auparavant utilisées comme champs, ou si elles résultent d'un biais méthodique, puisque les sols agricoles n'ont été échantillonnés que de façon lacunaire jusqu'à présent, et avec des profils incomplets.

## **Implications pour la pratique**

Les connaissances acquises sur les stocks de carbone, les facteurs d'influence, les écarts par rapport au modèle YASSO et son potentiel d'amélioration apportent une contribution précieuse à l'Inventaire suisse des gaz à effet de serre, mais également à celui d'autres pays européens.

Les résultats peuvent en outre servir de référence pour les stocks de carbone dans les sols forestiers suisses. Au niveau régional, les comparaisons permettent d'évaluer plus efficacement les conséquences de perturbations (travaux de construction, tempête).

## **Recommandations**

Le projet « Sols forestiers » s'est focalisé sur la recherche fondamentale, raison pour laquelle seules des recommandations indirectes peuvent être formulées.

1. Les sols (forestiers) sont un réservoir de carbone important, constitué au cours de milliers d'années. La mesure la plus appropriée pour garantir que ce réservoir perdure est de préserver des sols peu perturbés, « naturels », puisque les dérangements – changement d'affectation du sol, intensification de l'exploitation forestière, tempête ou travaux de construction – stimulent la décomposition de l'humus et entraînent des pertes importantes de carbone. Avec la sécheresse croissante qui se profile du fait du changement climatique, du moins dans certaines régions comme le Valais, il faut s'attendre à une baisse des stocks. C'est particulièrement le cas pour les sols actuellement saturés d'eau (environ 20% de tous les sols), qui stockent 33% de plus de carbone que les milieux secs. Le drainage de ces sols entraînerait des pertes de carbone avec lui. Sachant que les sols forestiers suisses contiennent les stocks de carbone les plus élevés d'Europe, ils peuvent aussi devenir de grandes sources de CO<sub>2</sub>.
2. Concernant l'inventaire des stocks de carbone et celui de leurs modifications dans le cadre de l'Inventaire des gaz à effet de serre, nos résultats induisent les recommandations suivantes : (i) Il faut prélever des échantillons des sols des surfaces agricoles complets afin d'effectuer une comparaison des différents types d'utilisation du sol dans tout le pays. (ii) Afin de pouvoir mieux évaluer les conséquences du (re-) boisement qui est considérable, il faut réaliser des analyses ciblées de chronoséquences de forêts d'âges différents. (iii) Les modifications dans le stockage du carbone ne se repèrent que par des échantillonnages répétés et systématiques. (iv) Il faut améliorer le modèle YASSO en le couplant avec un modèle de bilan hydrique, en y intégrant les processus de stabilisation, et en le validant par des valeurs mesurables permettant de tracer la dégradation du carbone (14C).