

Accumulation des stocks de carbone dans les sols sous des cultures bioénergétiques de *Populus* spp., *Salix* spp. et *Panicum Virgatum*

Martine Routhier, Benoit Lafleur and Nicolas Bélanger

Volume 14, Number 2, September 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1034701ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Routhier, M., Lafleur, B. & Bélanger, N. (2014). Accumulation des stocks de carbone dans les sols sous des cultures bioénergétiques de *Populus* spp., *Salix* spp. et *Panicum Virgatum*. *VertigO*, 14(2).

Article abstract

Globally, soils contain about 2000 Gt of carbon (C). Over the past centuries, however, land use has contributed to the release of about 140 Gt of C to the atmosphere. Nonetheless, the establishment of crops on marginal lands could reduce atmospheric C by accumulating it in soils. This study aimed to identify the effects of soil texture, land use history and time following cultivation on soil C accumulation since the establishment of two woody species (*Populus* spp. , and *Salix* spp.) and one herbaceous species (*Panic virgatum*). Overall, over relatively short periods of time (less than 20 years), our results indicate that these cultures accumulate a considerable amount of soil organic carbon (SOC) compared to previous land uses. Under woody species and *P. virgatum*, sites with clay content >20 % had SOC stocks 10-20 % higher than control sites, whereas this difference was approximately 5 % for crops with soil clay content <20 %. Moreover, the establishment of woody crops on former croplands as well as grasslands and pastures resulted in an increase in SOC of about 4 % and 19 %, respectively. The establishment of *P. virgatum* on farmlands resulted in a 12 % increase in SOC stocks, while the conversion from grasslands and pastures resulted in an increase of only 5 %. Finally, the age of the cultures of woody species had little effect on SOC stocks, whereas the cultures of *P. virgatum* <5 years and >5 years had COS stocks 5 % and 11 % higher than the control sites, respectively. The results suggest that C accumulation depends on several factors, including : (1) soil clay content, which promotes the formation of chemically stable organo-mineral compounds that physically protect C from bacterial activity, (2) soil tillage under intensive annual cultures which may have resulted in COS loss over several years, thus providing greater accumulation potential in the new culture, (3) the root profile which, depending on species, increases soil C at different depths, and (4) the amount of biomass produced, which dictates the importance of C fluxes to the soil in the short- and mid-term.



Martine Routhier, Benoit Lafleur et Nicolas Bélanger

Accumulation des stocks de carbone dans les sols sous des cultures bioénergétiques de *Populus* spp., *Salix* spp. et *Panicum Virgatum*

Introduction

- 1 À l'échelle mondiale, la quantité de carbone contenue dans les sols est estimée entre 1500 et 2250 Gt tonne (Eswaran et al., 1993 ; Batjes, 1996), constituant ainsi la plus grande réserve de carbone de la planète. La séquestration du carbone (C) étant devenue un enjeu important dans la lutte aux changements climatiques (GIEC, 2007), l'évaluation des stocks et l'estimation des flux revêtent par conséquent une grande importance dans notre compréhension de la dynamique du C et des changements climatiques.
- 2 La dynamique du carbone organique dans le sol (COS) est modulée par les échanges entre l'atmosphère, la pédosphère et la végétation (Nieder et Benbi, 2008). Les débris végétaux, notamment les feuilles, les tiges, les racines et l'écorce (ci-après, la litière), constituent la principale source de C qui incorpore le sol. La décomposition de la litière mène à la production de deux grands types de résidus, soit les résidus structuraux (c.-à-d. cellulose et hémicellulose) et métaboliques (c.-à-d. protéines, lipides, acides nucléiques). Les résidus structuraux prennent plus de temps à se décomposer que les résidus métaboliques (1 à 5 ans vs. <1 an, respectivement) (Sartori et al., 2006). Lors de la décomposition, ces produits sont incorporés aux stocks de COS, alors que le dioxyde de carbone (CO₂) est retourné vers l'atmosphère par l'oxydation de la matière organique durant la respiration microbienne.
- 3 Au cours des derniers siècles, l'utilisation et l'aménagement des sols ont favorisé des pertes importantes de COS. À l'échelle globale, la destruction des milieux humides et la conversion des milieux forestiers en terres agricoles auraient contribué à la libération vers l'atmosphère de 136±55 Gt de COS (Lal, 2004a). Cette situation pourrait être renversée par une utilisation des terres agricoles qui favorise l'accumulation du COS. L'une des stratégies visées en milieu agricole est de minimiser le travail du sol, plus spécifiquement le labour, afin de conserver sa structure. En effet, le travail mécanique du sol contribue à fragmenter les agrégats et à diminuer l'effet structurant des vers de terre, ce qui a pour effet de réduire la stabilité du sol et occasionne ainsi des pertes de COS par érosion (Six et al. 1999). De plus, le labour favorise l'augmentation de la température du sol, ce qui accélère les pertes de COS de par la minéralisation de la matière organique (VandenBygaart et al., 2003 ; Lal, 2004a ; Sartori et al., 2006).
- 4 Par ailleurs, l'établissement de certains types de cultures semble prometteur pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre les changements climatiques. En effet, certaines cultures permettraient de réduire le CO₂ accumulé dans l'atmosphère parce qu'elles accumuleraient du C dans leur biomasse, accumuleraient du COS et remplaceraient, du moins en partie, les combustibles fossiles (Lal, 2004a ; Cantarello et al., 2011). Toutefois, il est probable que le potentiel d'accumulation du COS varie entre les types d'espèces mises en culture. En effet, les espèces herbacées vivaces accumulent la plus grande part du C dans leur système racinaire, alors que les espèces ligneuses accumulent une grande quantité de C dans leurs parties aériennes (Mokany et al., 2006). Ces différences fonctionnelles des plantes quant à l'allocation du C dans leurs parties aériennes et souterraines ont des impacts notables sur les flux de C via la litière et, de ce fait, sont susceptibles d'avoir des répercussions sur la capacité à accumuler le COS (De Deyn et al., 2008).
- 5 L'accumulation du COS est contrôlée par des facteurs autres que les flux de C, notamment les propriétés physico-chimiques du sol (dont la concentration initiale en carbone organique (C_{org})), la productivité végétale du site, l'âge des cultures, l'affectation historique du territoire (pâturage, forêt, agriculture, prairie) et les conditions pédologiques locales (par exemple :

le climat, la texture et la profondeur du dépôt, la topographie, etc.). Selon Sartori et al. (2006), les terres agricoles abandonnées ou marginales seraient particulièrement propices à l'établissement de plantations et de cultures bioénergétiques et à l'accumulation du COS. D'autres suggèrent même de planter des arbres pour contrôler la désertification, accumuler davantage de COS et réduire les concentrations de CO₂ atmosphérique (Li et al., 2014)

- 6 Cette revue de la littérature poursuivait deux objectifs, le premier étant d'identifier les effets de l'environnement et des pratiques culturales sur l'accumulation du COS dans des cultures bioénergétiques. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux effets de la texture du sol, du temps écoulé depuis la mise en culture et de l'affectation historique du territoire. Le deuxième objectif était de comparer la performance de deux types fonctionnels de végétaux (c.-à-d. deux espèces ligneuses et une espèce herbacée) fréquemment mis en production à des fins énergétiques. À cet effet, nous nous sommes intéressés au peuplier (*Populus* spp. ; ligneuse), au saule (*Salix* spp. ; ligneuse) et au panic érigé (*Panicum virgatum* ; herbacée). Ces trois espèces sont probablement favorables à l'accumulation du COS parce qu'elles : (i) ont un système racinaire largement développé et profondément distribué qui favorisent l'accumulation de matière organique dans le sol, (ii) produisent beaucoup de biomasses en peu de temps, et (iii) s'adaptent assez bien à des conditions de croissance plus ou moins favorables.

Méthodologie

Revue de la littérature

- 7 Afin de répondre aux objectifs de cette étude, nous avons constitué une base de données à partir de la consultation de plusieurs articles de recherche et de méta-analyses sur les cultures de *Populus* spp. , *Salix* spp. et *P. virgatum*. Les articles et les méta-analyses retenus devaient inclure les informations suivantes : la quantité de COS sous forme de stock (p. ex. Mg ha⁻¹, T ha⁻¹), le nombre d'années écoulé depuis l'établissement de la culture, la texture du sol et l'affectation historique du territoire (c.-à-d. la vocation antérieure du site). Par ailleurs, dans chacun des articles retenus, le stock de COS sous *Populus* spp. , *Salix* spp. ou *P. virgatum* devait être comparé à des sites témoins. Les sites témoins devaient rencontrer l'un des critères suivants : (i) les stocks de COS avaient été mesurés avant l'établissement de la culture bioénergétique, ou (ii) les stocks de COS avaient été mesurés dans un champ limitrophe à la culture bioénergétique dont l'affectation historique du site et les caractéristiques de sol étaient sensiblement les mêmes que ceux de la culture bioénergétique. Dans le cas des témoins à partir de champs limitrophes, il faut accepter la possibilité que les sols et les conditions pédoclimatiques n'étaient pas exactement les mêmes que ceux sous les trois cultures à l'étude. Les études qui comptaient des sites expérimentaux fertilisés ou soumis à des traitements à l'insecticide ont été retenues aux fins de cette présente recherche. Le tableau 1 dresse la liste des références retenues pour l'étude.

Tableau 1. Études retenues par la présente étude.

| Référence | Nombre d'observations | Localisation | Espèces | Âge | % argile | Affectation historique du territoire |
|-----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|----------|------------|--------------------------------------|
| Bonin et Lal (2014) | 5 | USA | <i>Pv</i> , <i>Ss</i> | 7 | <20 et >20 | Pr, Tc |
| Ceotto et Di Candilo (2011) | 2 | Italie | <i>Ss</i> | 7 | <20 | Tc |
| Coleman et al. (2004) | 22 | USA | <i>Ps</i> | 1 à 27 | <20 et >20 | Pr, Tc |
| Corre et al. (1999) | 7 | USA | <i>Pv</i> | 10 à 18 | <20 | Pr |
| Grigal et Berguson (1998) | 5 | USA | <i>Ps</i> | 6, 7, 15 | <20 et >20 | Tc |
| Jug et al. (1999) | 10 | Allemagne | <i>Ps</i> , <i>Ss</i> | 7, 10 | <20 et >20 | Pr, Tc |

| | | | | | | |
|-----------------------|----|-----------|--------|---------------|------------|----|
| Kahle et al. (2013) | 2 | Allemagne | Ss | 17 | <20 | Tc |
| Liebig et al. (2005) | 19 | USA | Pv | 10 | ND | Pr |
| Liebig et al. (2008) | 7 | USA | Pv | 5 | <20 | Pr |
| Omonode et Vyn (2006) | 35 | USA | Pv | 5, 6, 8 | <20 et >20 | Tc |
| Pacaldo et al. (2013) | 4 | USA | Ss | 5, 12, 14, 19 | <20 | Tc |
| Potter et al. (1999) | 1 | USA | Pv | 6 | >20 | Tc |
| Zan et al. (2001) | 4 | Canada | Pv, Ss | 5 | <20 | Tc |

Espèces : Ps, *Populus* spp. ; Pv, *Panicum virgatum* ; Ss, *Salix* spp.

Affectation historique du territoire : Pr, prairie+pâturages ; Tc, terres cultivées.

ND : information non disponible dans l'article ; cet article n'a pas été inclus dans l'analyse des effets de la teneur en argile.

Analyse des données

- 8 Pour l'ensemble des références retenues au tableau 1, un total de 123 observations ont été utilisées afin de tester les effets des cultures de *Populus* spp, *Salix* spp et *P. virgatum* sur l'accumulation du COS (tableau 2). Plus spécifiquement, nous avons comparé les quantités de COS (Mg ha^{-1}) dans les champs en culture à celles des témoins (c.-à-d. les quantités avant l'établissement des cultures ou les quantités dans les champs limitrophes aux cultures). Puisque les profondeurs échantillonnées n'étaient pas les mêmes d'une étude à l'autre, nous avons homogénéisé la base de données en calculant la variation en pourcentage des stocks de COS ($\Delta \% \text{ COS}$) entre les cultures et les témoins selon la méthode de Laganière et al. (2010) :

$$[1] \quad (\Delta \% \text{ COS} = (\text{COS}_{\text{culture}} / \text{COS}_{\text{témoin}}) \times 100$$

- 9 Où $\text{COS}_{\text{culture}}$ est le C_{org} du sol sous la culture bioénergétique et $\text{COS}_{\text{témoin}}$ est le C_{org} du sol dans le témoin (c.-à-d. avant l'établissement de la culture bioénergétique ou dans le champ limitrophe à la culture bioénergétique).

Tableau 2. Nombre d'observations par espèce par variable.

| Espèce | Texture (% argile) | | Âge (ans) | | Historique du site | |
|---|--------------------|-------|-----------|----|--------------------|------------------|
| | <20 % | >20 % | <5 | >5 | Terre agricole | Prairie+pâturage |
| <i>P. virgatum</i> | 40 | 37 | 29 | 14 | 39 | 40 |
| <i>Populus</i> spp. + <i>Salix</i> spp. | 18 | 12 | 45 | 35 | 35 | 7 |

- 10 La variation (%) des stocks de COS entre les cultures et les témoins été calculée pour chacun des critères de classification suivants : texture du sol, âge des cultures et affectation historique des sites. En ce qui a trait à la texture, les sols ont été catégorisés selon leur contenu en argile, soit <20% et >20%; le choix de ce seuil repose sur des expériences sur le terrain et en laboratoire qui démontrent que le COS est physiquement mieux protégé de la décomposition microbienne par des composés organo-minéraux chimiquement stables lorsque le contenu en argile est >20 % (Baldock et Skjemstad, 2000 ; Heywood et Turpin, 2013). De même, les sites ont été catégorisés selon leur âge, <5 ans et >5 ans ; le choix de ce seuil s'explique du fait que les sols de cultures ligneuses intensives pourraient constituer des sources de C durant les 4 à 6 premières années suivant l'établissement de la culture, après quoi celles-ci deviendraient graduellement un puits de C (Hansen, 1993 ; Paul et al., 2002). Enfin, les sites ont été classifiés en deux catégories d'affectation historique du territoire avant la mise en place de la culture : (1) les prairies et les pâturages et (2) tous les autres types de cultures intensives caractérisées par des cycles courts de production et de labour (p. ex. maraîchères, céréales, maïs). Cette

classification a été choisie afin de différencier les effets de la culture entre des sites ayant subi relativement peu de perturbations anthropiques (prairies et pâturages) dans un passé récent et des sites soumis à un régime de perturbations anthropiques intensif ayant eu des effets négatifs sur les stocks de COS (cultures maraîchères, céréales, maïs...) (Young et al., 2005 ; Wilson et al., 2011 ; Heywood et Turpin, 2013).

Résultats et discussion

Teneur du sol en argile

- 11 Tant sous les cultures d'espèces ligneuses (c.-à-d. *Populus* spp et *Salix* spp.) que sous *P. virgatum*, la teneur du sol en argile semble avoir un effet sur les stocks de COS. Pour *P. virgatum*, les sols des plantations et des cultures dont la teneur en argile est <20 % contiennent environ 5 % de plus de C_{org} que les témoins, alors que cette différence est de 19 % pour les sites dont la teneur en argile est >20 % (figure 1). De façon similaire, pour les espèces ligneuses, les sols des cultures dont la teneur en argile est <20 % contiennent environ 5 % de plus de C_{org} que les témoins, alors que cette différence est de 10 % pour les sites dont la teneur en argile est >20 % (figure 1). La figure 2 illustre la relation entre les valeurs absolues des stocks de COS des témoins (x) et ceux des cultures (y) selon leurs teneurs en argile. Autant pour *P. virgatum* que *Populus* spp. et *Salix* spp. , on observe une bonne dispersion des points autour de la ligne 1 :1 (traitillé gris) et plusieurs sites dont la teneur en argile est <20 % se situent en dessous sous cette ligne. Toutefois, la majorité des observations dans les sites où la teneur en argile est >20 % se situe au-dessus de la ligne 1 :1, signifiant que les stocks de COS des cultures sont supérieurs à ceux des témoins pour la plupart des sites caractérisés par des sols argileux.

Figure 1. Variation en pourcentage des stocks de C_{org} du sol ($\Delta \%COS \pm$ erreur standard) entre les cultures bioénergétiques (*Populus+Salix* et *P. virgatum*) et les témoins selon la teneur des sols en argile (<20% ou >20%).

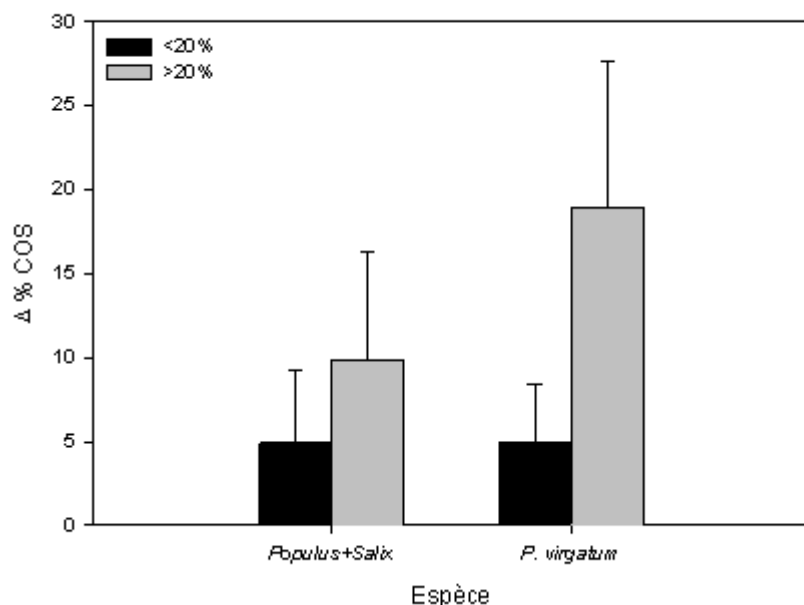
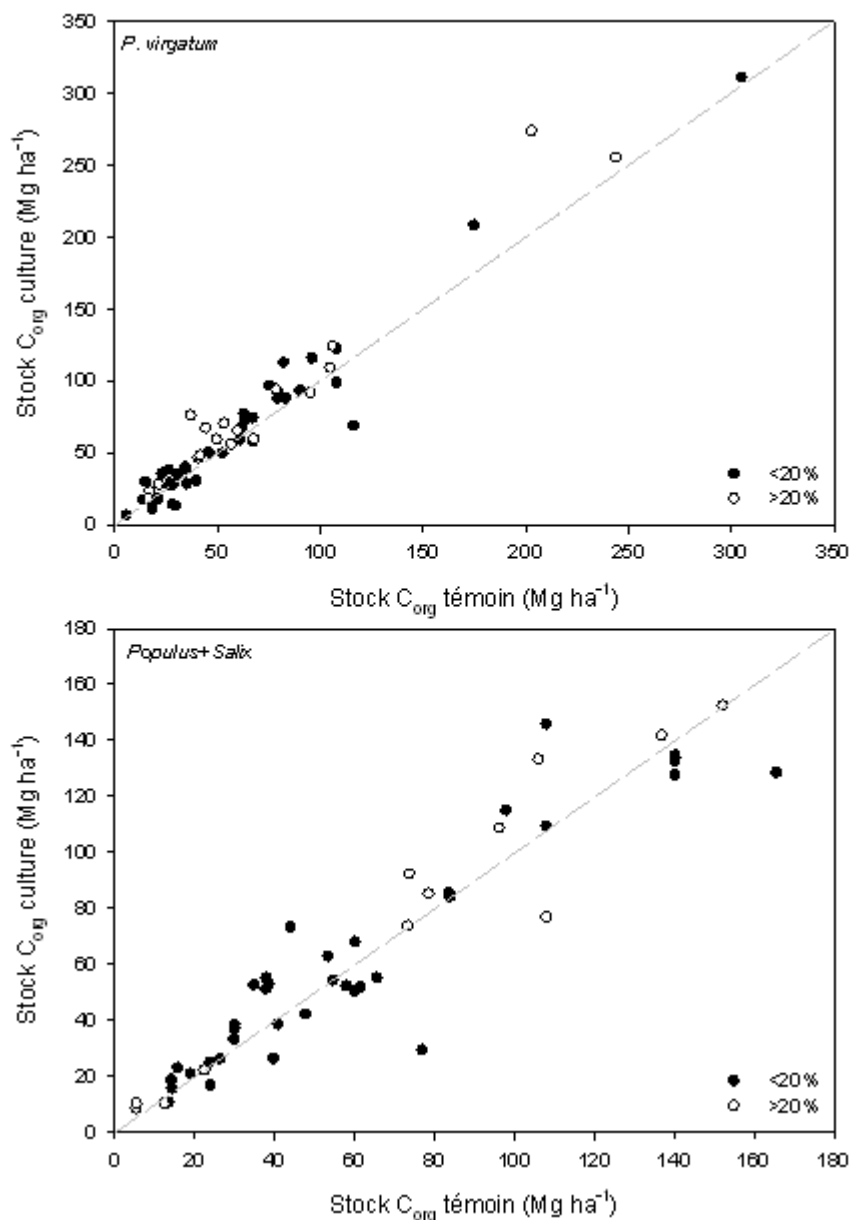


Figure 2. Relations entre le stock de C_{org} du sol (COS) des témoins et celui des cultures (*P. virgatum* (a) et des espèces ligneuses (b)). Pour chacun des sites, la teneur du sol en argile est indiquée (<20 %, cercles fermés ; >20 %, cercles ouverts). Le traitillé gris représente la ligne 1 :1.



- 12 Nos résultats, tant pour les espèces ligneuses que pour *P. virgatum*, sont en accord avec d'autres auteurs qui suggèrent qu'une teneur élevée en argile (>20 %) favorise l'accumulation du COS (Baldock et Skjemstad, 2000 ; Sartori et al., 2006 ; Laganière et al., 2010 ; Heywood and Turpin, 2013). Les teneurs en argile plus élevées favorisent la formation de composés organo-minéraux chimiquement stables qui protègent physiquement le C de l'activité bactérienne. À l'inverse, les sols constitués majoritairement de particules grossières et contenant de faibles teneurs en argile sont plus susceptibles à la décomposition rapide de la matière organique, à l'oxydation du C ainsi qu'à l'érosion des sols (Van Veen et Kuikman, 1990). Pour les sites dont la teneur en argile est <20%, l'effet des argiles sur les stocks COS est variable et les stocks sont probablement expliqués par d'autres facteurs comme l'effet du milieu sur la qualité chimique de la litière et les formes de C produites lors de la décomposition (Coûteaux et al., 1995 ; Fortunel et al., 2009). Cette tendance générale entre les sites ayant des teneurs en argile inférieures ou supérieures à 20% ne semble pas différente pour les sols des cultures bioénergétiques de *Populus* spp. , *Salix* spp. et *P. virgatum*.

Affectation historique du territoire

- 13 L'affectation historique du territoire semble également contrôler les stocks de COS sous les cultures bioénergétiques. L'établissement de cultures d'espèces ligneuses sur des terres agricoles a entraîné une augmentation de COS de l'ordre de 4%, alors que la conversion à partir de prairies et de pâturages a entraîné une augmentation de 19 % (figure 3). Nos résultats indiquent aussi que l'affectation historique du territoire influence les stocks de COS sous *P. virgatum*. Toutefois, contrairement aux cultures d'espèces ligneuses, ce sont les terres préalablement cultivées qui ont accumulé le plus de COS (12 %) par rapport aux témoins. Les prairies et les pâturages ont accumulé seulement 5% de plus de COS que les témoins (figure 3). La figure 4 illustre la relation entre les valeurs absolues des stocks de COS des sites témoins (x) et ceux des cultures (y) en fonction des affectations historiques du territoire. Les observations pour les cultures de *P. virgatum* sont assez bien réparties autour de la ligne 1 : 1 (traitillé gris) pour les sites où les valeurs absolues des stocks de COS sont inférieures à 50 Mg ha⁻¹. Pour les stocks supérieurs à 50 Mg ha⁻¹, toutefois, les points se situent majoritairement au-dessus de la ligne 1 : 1, signifiant que les stocks de COS des cultures sont supérieurs à ceux des témoins une fois que ce seuil est dépassé. Pour *Populus* spp. et *Salix* spp., toutefois, on observe une plus grande dispersion des points de part et d'autre de la ligne 1 : 1 tout au long du gradient de stocks. On note que les quelques points de la base de données récoltés dans les prairies et les pâturages se situent majoritairement au-dessus de cette ligne.

Figure 3. Variation en pourcentage des stocks de C_{org} du sol (Δ %COS \pm erreur standard) entre les cultures bioénergétiques (*Populus*+*Salix* et *P. virgatum*) et les témoins selon l'affectation historique du territoire (terres cultivées vs prairies+pâturages).

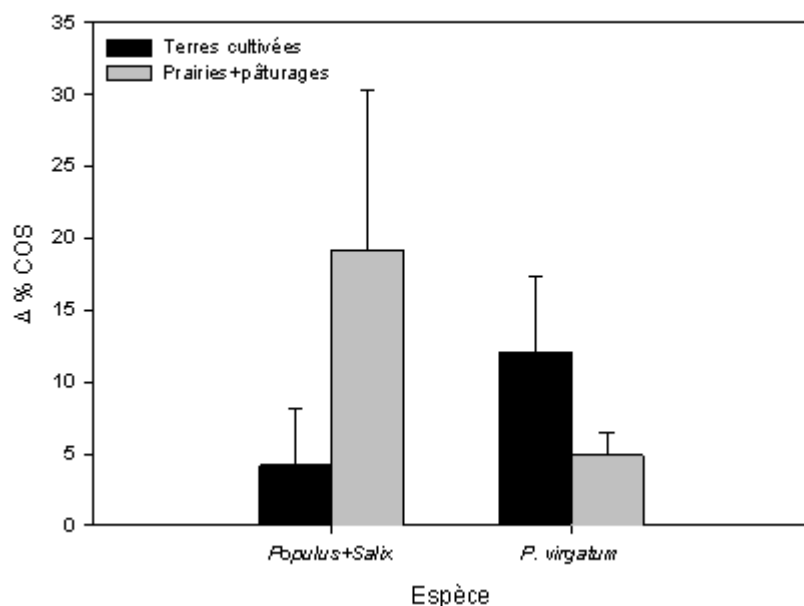
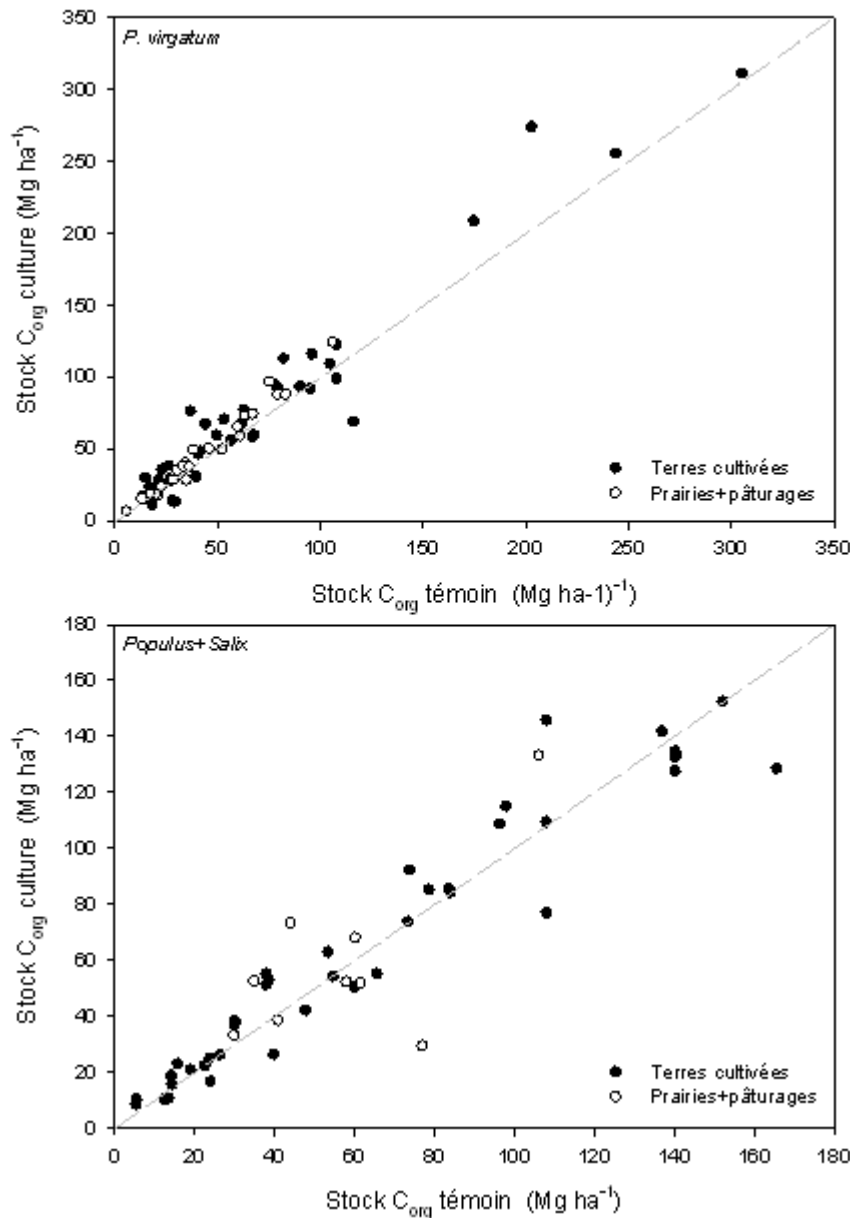


Figure 4. Relations entre le stock de C_{org} du sol des témoins et celui des cultures (*P. virgatum* (a) et des espèces ligneuses (b)). Pour chacun des sites, l'affectation historique du territoire est indiquée (terres cultivées, cercles fermés ; prairies+pâturages, cercles ouverts). Le traitillé gris représente la ligne 1 : 1.



- 14 Le potentiel d'accumulation de COS est généralement élevé dans les terres cultivées en raison des faibles apports en C liés aux types de culture ainsi que de la perte historique de COS due au travail mécanique des sols, notamment le labour intensif (Lal, 2004 b ; Conant et al., 2007). Pour maximiser le stockage de COS en milieu agricole, on recommande donc généralement de réduire le travail du sol afin de conserver le plus possible sa structure (Aslam et al., 1999). Pour les cultures de *P. virgatum*, l'augmentation plus élevée des stocks de COS dans les terres cultivées pourrait s'expliquer à première vue par des stocks initiaux de COS plus faibles que dans les prairies et les pâturages (figure 3). Toutefois, on remarque à la figure 4 que les stocks initiaux de COS des prairies et des pâturages n'étaient pas supérieurs à ceux des terres cultivées. Ce sont surtout les sites qui contenaient des stocks initiaux de COS supérieurs à 50 Mg ha^{-1} , principalement des terres cultivées, qui semblent avoir accumulés du C_{org} sous l'effet de *P. virgatum* (figure 4). Dans ce cas-ci, il est possible que les sites caractérisés par des sols initialement pauvres en C_{org} aient supporté de trop faibles croissances de *P. virgatum* et des flux de litière (aérienne ou souterraine) trop petits pour favoriser un gain en COS. Par exemple,

Li et al. (2014) ont démontré que le potentiel d'accumulation en C_{org} suite au rétablissement de la végétation sur des sols très pauvres (c.-à-d., dunes de sable) est supérieur lorsque les conditions hydroclimatiques et physiques (par ex., susceptibilité des sols à l'érosion) du milieu permettent une plus grande production de biomasse et un apport plus important de C_{org} au sol via la litière.

- 15 Les prairies et les pâturages sont souvent représentés par un sol en surface (c.-à-d. horizon Ah des 10 à 20 premiers centimètres) caractérisé par de riches teneurs en C_{org} . L'horizon se forme grâce à l'apport de matière organique principalement par les racines des graminées, lesquelles sont dominantes dans ces écosystèmes étant donné les climats secs qui dominent (Cordova et Lehman, 2005). L'augmentation plus élevée des stocks de COS par les espèces ligneuses sous les prairies et les pâturages peut possiblement s'expliquer du fait que, contrairement aux graminées, les racines de *Populus* spp. et *Salix* spp. se développent en profondeur (Jobbágy et Jackson, 2000). Les études démontrent que le système racinaire (notamment les racines fines) des plantations d'arbres établies dans ces types d'environnement se développe surtout sous l'horizon Ah (ou Ap s'il est travaillé mécaniquement). À long terme (>30 ans), en l'absence du système racinaire des graminées, les stocks de C_{org} dans l'horizon Ah diminuent, alors qu'ils augmentent en profondeur (dans l'horizon B) de par l'apport en C par les racines des arbres (Polglase et al., 2000 ; Pinno et Bélanger, 2008). Dans notre base de données, la plupart des cultures de *Populus* spp. et *Salix* spp. établies dans des prairies et des pâturages sont relativement jeunes, c.-à-d. <12 ans (moyenne = 6 ans). Il est donc fort probable que nos résultats s'expliquent par une hausse des stocks de C_{org} dans l'horizon B sans pour autant avoir subi des pertes importantes à court terme de C_{org} dans l'horizon Ah. Les racines mortes des graminées ont pu être une source de C_{org} pouvant être incorporée à l'horizon Ah pour les sites les plus jeunes (<5 ans) ou encore les horizons Ah des prairies et des pâturages ont des formes de C_{org} assez stables (Tate et al., 2000) qui ont résisté à la décomposition par les microorganismes pendant ces courtes périodes. Au contraire, Balesdent et al. (1998) ont proposé que la protection du COS des terres agricoles diminue beaucoup à cause du labour et conséquemment, les plus petits gains nets de COS suite à l'établissement d'espèces ligneuses sous cette affectation historique du territoire s'expliqueraient surtout par les plus grandes pertes à court terme de C_{org} dans les horizons de surface que ceux des prairies et des pâturages.

Âge de la culture

- 16 Pour *P. virgatum*, les stocks de COS pour les cultures de <5 ans étaient de 5 % supérieur aux témoins, alors que cette différence était de 11 % pour les cultures de >5 ans (figure 5). L'âge des cultures de *Populus* spp. et *Salix* spp. semble avoir eu peu d'effets sur les stocks de COS — tant les cultures ligneuses de <5 ans que celles de >5 ans ont accumulé en moyenne 6 % de plus de COS que les témoins (figure 3). La figure 6 illustre la relation entre les valeurs absolues des stocks de COS des témoins (x) et ceux des cultures (y) selon leurs âges. Comme pour les stocks de COS en fonction de l'affectation historique du territoire, les observations pour les cultures de *P. virgatum* se situent majoritairement au-dessus de la ligne 1 : 1 seulement pour les sites ayant des stocks initiaux supérieurs à 50 Mg ha⁻¹. Pour *Populus* spp. et *Salix* spp., on observe une dispersion des points de part et d'autre de la ligne 1 : 1 tout au long du gradient de stocks de COS.
- 17 À court terme, c.-à-d. à l'intérieur de 5 ans de la mise en terre, nos résultats suggèrent, tant dans les cultures de *Populus* spp. et de *Salix* spp. que dans celles de *P. virgatum*, qu'il y a peu de sites ayant subi des pertes notables de COS. Ceci pourrait s'expliquer en partie par une production de biomasse racinaire et aérienne généralement forte de *Populus* spp., *Salix* spp. et *P. virgatum* dès les premières années suivant la mise en culture (Pregitzer et Friend, 1996 ; Zhang et al., 2003 ; Labrecque et Teodorescu, 2005 ; Omonode et Vyn, 2006 ; Ens et al., 2009). En très peu de temps, grâce à des gains rapides en biomasse, ces espèces formeraient un réseau racinaire dense fournissant l'eau et les nutriments aux parties aériennes. De plus, le taux de remplacement des racines de ces espèces serait assez élevé (Pregitzer et Friend, 1996 ; Rytter et Rytter, 1998 ; Block et al., 2006 ; Rytter, 2013), ce qui assurerait un flux important de matière organique aux sols et enrichirait ceux-ci en C_{org} (Rytter et Rytter, 1998).

Figure 5. Variation en pourcentage des stocks de C_{org} du sol ($\Delta \%COS \pm$ erreur standard) entre les cultures bioénergétiques (*Populus+Salix* et *P. virgatum*) et les témoins selon l'âge de la culture (<5 ans ou >5 ans).

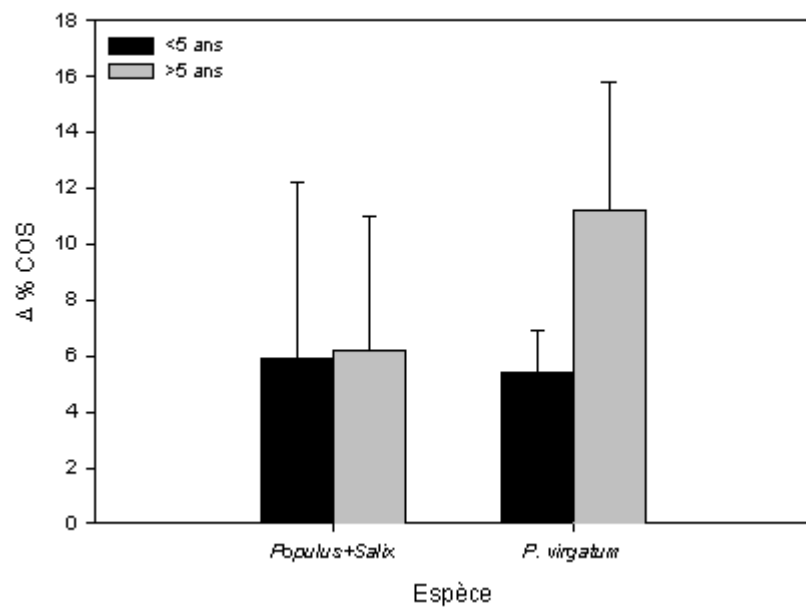
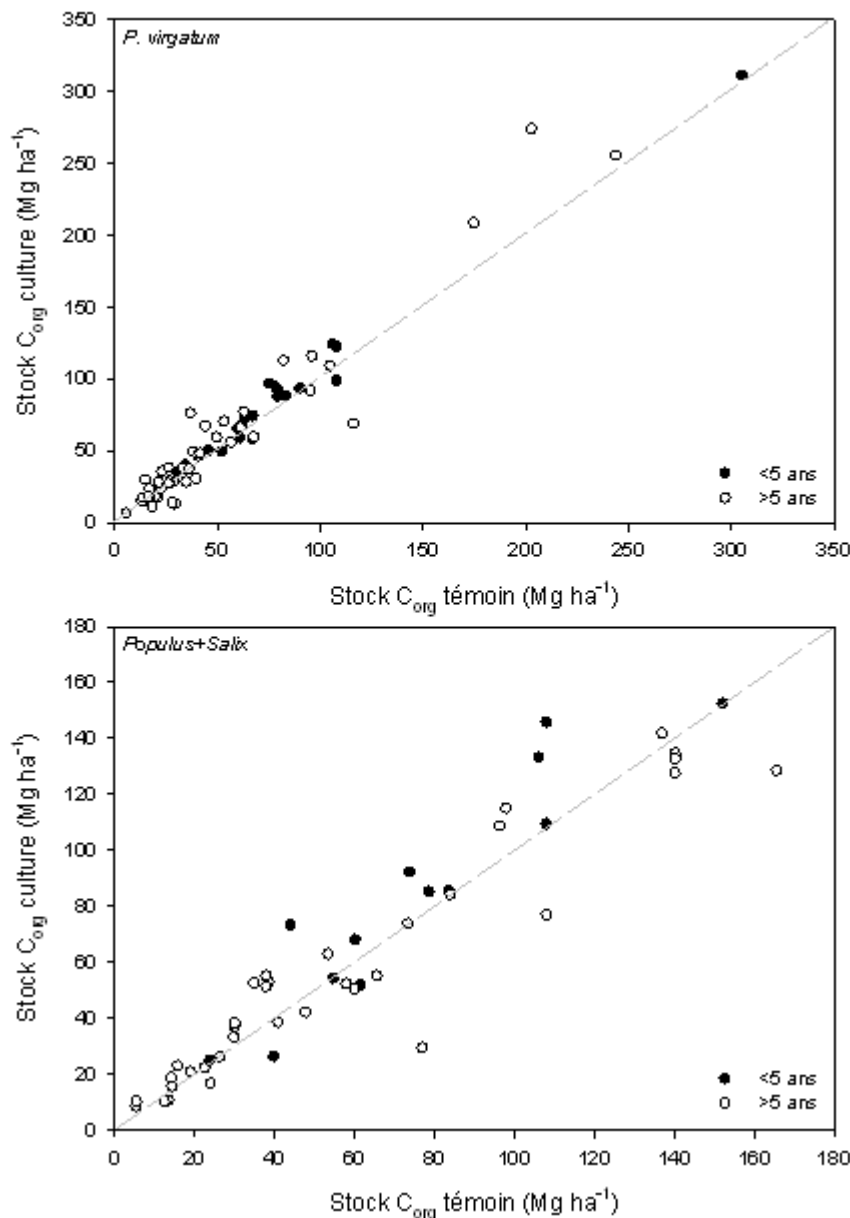


Figure 6. Relations entre le stock de C_{org} du sol (COS) des témoins et celui des cultures (*P. virgatum* (a) et des espèces ligneuses (b)). Pour chacun des sites, l'âge des cultures est indiqué (<5 ans, cercles fermés ; >5 ans, cercles ouverts). Le traitillé gris représente la ligne 1 :1.



- 18 Le temps écoulé depuis l'établissement de la culture joue un rôle dans le stockage du COS seulement pour les cultures de *P. virgatum*. Selon Sartori et al. (2006), il faut 3 à 35 ans pour qu'un sol ayant connu un changement du type de culture atteigne un nouvel état d'équilibre en regard du COS et ne puisse plus accumuler de C_{org} . Dans la présente base de données analysée, les cultures de *P. virgatum* âgées de >5 ans ont majoritairement été établies sur des terres préalablement cultivées. Comme discuté dans la section précédente, les gains de C_{org} sont plus susceptibles d'être plus importants pour les sites où des cultures maraîchère ou céréalière occupaient l'espace avant l'établissement (Lal et al., 2004 b ; Conant et al., 2007). Toutefois, il est encore à noter que les cultures de *P. virgatum* établies il y a plus de 5 ans sur des terres cultivées et ayant accumulé du C_{org} dans leurs sols avaient toutes des stocks initiaux de COS supérieurs à 50 Mg ha^{-1} . Ainsi, le remplacement de cultures agricoles classiques par le *P. virgatum* aurait un effet plus marqué sur certains sites et dépendrait, entre autres, du taux de COS avant l'implantation de la culture bioénergétique. Enfin, la différence en terme de gain de COS entre les plantations de *P. virgatum* et celles d'espèces ligneuses âgées de >5 ans pourrait

être expliquée par un plus fort taux de croissance à court terme pour *P. virgatum*. En effet, les espèces ligneuses prennent généralement plus de temps que les espèces herbacées avant de refermer leur canopée et de développer leur appareil photosynthétique. La variabilité de la réponse des sols sous l'effet des cultures d'espèces ligneuses pourrait donc signifier que, sous certaines conditions climatiques ou édaphiques, l'augmentation des stocks de COS pourrait prendre plusieurs années (>10 ans) avant d'être observable (Laganière et al. 2010).

Conclusion

- 19 Cette revue de littérature suggère que les cultures d'espèces ligneuses et herbacées sont aptes à augmenter le C_{org} dans les sols comparativement aux sites soumis depuis plusieurs années à des cultures annuelles (par ex., cultures maraîchères, maïs...) ou à des pâturages. Selon nos analyses, cette aptitude est toutefois liée à divers facteurs, entre autres, à la teneur des sols en argile, à l'affectation historique du territoire, au temps écoulé depuis l'établissement de la culture et aux stocks de C_{org} dans les sols avant l'établissement des cultures. De par la base de données et notre analyse, il est difficile de déterminer quels facteurs ont le plus d'influence sur les stocks de C_{org} des sols et comment ils interagissent entre eux pour les influencer. La base de données ne permet pas non plus d'identifier toutes les conditions de sites (stocks initiaux de COS, climat, topographie, etc.) qui expliquent le phénomène d'accumulation du COS. Il semble aussi que les traits fonctionnels de divers types de végétation interviennent sur le potentiel d'accumulation du COS. *P. virgatum* permettrait d'accumuler le C_{org} dans les sols cultivés plus tôt après son établissement parce qu'il produirait beaucoup de biomasses plus rapidement que les espèces ligneuses. *Populus* spp. et *Salix* spp. auraient un potentiel d'accumulation supérieur dans les prairies et les pâturages en répartissant le C_{org} plus également dans le profil de sol via des racines plus profondes que le *P. virgatum*. Il sera vraisemblablement nécessaire de parfaire la base de données pour élucider toutes ces questions.
- 20 De nombreux projets de recherche sont en cours partout dans le monde afin d'évaluer le potentiel d'accumulation de C souterrain et aérien par les cultures bioénergétiques sur courte rotation. Ils permettront d'identifier les meilleures pratiques culturales (par ex., sélection des sites, des cultivars, du type de travail du sol, etc.) pour maximiser le rendement des cultures et le stockage de C_{org} dans les sols. Les sites disponibles pour de futures cultures bioénergétiques et capables d'accumuler le C_{org} dans les sols sont sans aucun doute nombreux. Aux États-Unis seulement, Lemus et Lal (2005) estiment que la superficie des terres marginales disponibles pour la plantation d'espèces dédiées à la production d'énergie s'élève à 58 Mha, ce qui représente un potentiel d'accumulation du C dans les sols de 52 Tg an⁻¹. Les sites ciblés peuvent être de nature différente. Les terres agricoles appauvries avec le temps de par une mauvaise gestion des sols, les terrains sensibles à l'érosion, les sites en voie de désertification et les sites pollués (par ex., mines en déclassé) pourraient être revitalisés par l'entremise des cultures bioénergétiques et ainsi permettre de lutter contre les changements climatiques. Des recherches devront également être menées afin d'évaluer si ces cultures pourront restaurer le C_{org} des sols aux niveaux initiaux, voire les augmenter, et d'évaluer les effets de rétroaction sur les changements climatiques.

Bibliographie

- Aslam, T., M.A. Choudhary et S. Saggard, 1999, Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil Tillage Research*, 51, pp. 103-111
- Baldock, J. et O.J. Skjemstad, 2000, Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biologic attack. *Organic Geochemistry*, 31, pp. 697-710
- Balesdent, J., E. Besnard, D. Arrouays et C. Chenu, 1998, The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and Soil*, 201, pp. 828-833
- Batjes, N. H., 1996, Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, pp. 151-163

- Block R.M.A., K.C.J. Van Rees et J.D. Knight, 2006, A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. *Agroforestry Systems*, 67, 73–84
- Bonin C. et R. Lal, 2014, Aboveground productivity and soil carbon storage of biofuel crops in Ohio. *Global Change Biology Bioenergy*, 6, pp. 67-75
- Cantarello, E., A.C. Newton et R.A. Hill, 2011, Potential effects of future land-use change on regional carbon stocks in the UK. *Environmental Science and Policy*, 14, pp. 40-52
- Ceotto, E. et M. Di Candilo, 2011, Medium-term effect of perennial energy crops on soil organic carbon storage. *Italian journal of Agronomy*, vol 6, no 4, e33
- Coleman, M.D., J.G. Isebrand, D.N. Tolsted et V.R. Tolbert, 2004, Comparing soil carbon of short rotation poplars plantations with agriculture crops and woodlots in North Central United States. *Environmental Management*, 33, pp. 229-308
- Conant, R.T., M. Easter, K. Paustian, A. Swam et S. Williams, 2007, Impact of periodic tillage on soil C stocks : A synthesis. *Soil and Tillage Research*, 95, pp. 1-10
- Cordova, C.E. et P.H. Lehman, 2005, Holocene environmental change in southwestern Crimea (Ukraine) in pollen and soil records. *Holocene*, 15, pp. 263-277
- Corre M.D., R.R. Schnable et J.A. Shaffer, 1999, Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, pp. 1531-1539
- Coûteaux, M.-M., P. Bottner et B. Berg, 1995, Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution*, 10, pp. 63-66
- De Deyn, G.B., J.H.C. Cornelissen et R.D. Bardgett, 2008, Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 11, pp. 516-531
- Ens, J., R.E. Farrell et N. Bélanger, 2013, Early effects of afforestation with willow (*Salix purpurea* "Hotel") on soil carbon and nutrient availability. *Forests*, 4, pp. 137-154
- Eswaran, H., E. Van Den Berg et P. Reich, 1993, Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 57, pp. 192-194
- Fortunel, C., E. Garnier, R. Joffre, E. Kazakou, H. Questes, K. Grigulis, S. Lavorel, P. Ansquer, H. Castro, P. Cruz, J. Doležal, O., Eriksson, H. Freitas, C., Golodets, C. Jouany, J. Kigel, M., Kleyer, V., Lehsten, J. Lepš, T., Meier, R. Pakeman, M.P. Papanastasiou, V.P. Papanastasis, F. Quétier, M. Robson, M. Sternberg, J.-P. Theau, A. Thébault et M. Zarovali, 2009, Leaf traits capture the effects of land-use changes and climate on litter decomposability of grasslands across Europe. *Ecology*, 90, pp. 698-611
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007, Mitigation of Climate change, dans *Climate Change 2007*, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, et L.E. Meyer (éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Grigal D.F. et W.E. Berguson, 1998, Soil carbon changes associated with short-rotation systems. *Biomass and Bioenergy*, 14, pp. 371-377
- Guo, L.B. et R.M. Gifford, 2002, Soil carbon stocks and land use change : A meta analysis. *Global Change Biology*, 8, pp. 345-360
- Hansen, E.A., 1993, Soil carbon sequestration beneath hybrid poplar plantations in the north central United States. *Biomass and Bioenergy*, 5, pp. 431-436
- Heywood, P. et S. Turpin, 2013, Variation in soil carbon stocks with texture and previous landuse in north-western NSW, Australia. *Sustainable Agriculture Research*, 2, pp. 124-133
- Jobbágy, E.G. et R.B. Jackson, 2000, The vertical distribution of carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10, pp. 423-436
- Jug A., F. Makeschin, K.E. Rehfuess et C. Hofmann-Schielle, 1999, Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects, *Forest Ecology and Management*, 121, pp. 85-99
- Kahle, P., J. Möller, C. Baum et A. Gurgel, 2013, Tillage-induced changes in the distribution of soil organic matter and the soil aggregate stability under a former short rotation coppice. *Soil and Tillage Research*, 133, pp. 49-53
- Labrecque, M. et T.I. Teodorescu, 2005, Field performance and biomass production of 12 willow and poplars in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy*, 29, pp. 1-9
- Laganière, J., D.A. Angers et D. Paré, 2010, Carbon accumulation in agriculture soils after afforestation : A meta-analysis. *Global Change Biology*, 16, pp. 439-453

- Lal, R., 2004a, Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma*, 123, pp. 1-22
- Lal, R., 2004b, Agricultural activities and the global carbon cycle, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70, pp. 103-116
- Lemus, R. et R. Lal, 2005, Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, pp. 1-21
- Li, Y., J. Han., S. Wang., J. Brandle, J. Lian, Y. Luo et F. Zhang, 2014, Soil organic carbon and total nitrogen storage under different land uses in the Naiman Banner, a semiarid degraded region of northern China. *Canadian Journal of Soil Science*, 94, pp. 9-20
- Liebig, M.A., H.A. Johnson, J.D. Hanson et A.B. Frank, 2005, Soil carbon under switchgrass stands and cultivated cropland. *Biomass and Bioenergy*, 28, pp. 347-354
- Liebig, M.A., M.R. Schmer, K.P. Vogel et R.B. Mitchell, 2008, Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy. *Bioenergy Research*, 1, pp. 215-222
- Mokany, K., R.J. Raison et A.S. Prokushkin, 2006, Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12, pp. 84-96
- Nieder, R. et D.K. Benbi, 2008, Carbon and Nitrogen in the Terrestrial Environment, Springer, New York, NY
- Omonode, R.A. et T.J. Vyn, 2006, Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 117, pp. 159-170
- Pacaldo, R.S., T.A. Volk et R.D. Briggs, 2013, No significant differences in soil organic carbon content along a chronosequence of shrub willow biomass crop fields. *Biomass and Bioenergy*, 58, pp. 136-142
- Paul, K.I., P.J. Polglase, J.G. Nyakuengama et P.K. Khanna, 2002, Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 168, pp. 241-257
- Pinno, B.D. et N. Bélanger, 2008, Ecosystem carbon gains from afforestation in the Boreal Transition ecozone of Saskatchewan (Canada) are coupled with the devolution of Black Chernozems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, pp. 56-62
- Polglase, P.J., K.I. Paul, P.K. Khanna, J.G. Nyakuengama, A.M. O'Connell, T.S. Grove et M. Battaglia, 2000, Change in soil carbon following afforestation or reforestation, Review of experimental evidence and development of a conceptual framework, National Carbon Accounting System Technical Report No. 20, Australian Greenhouse Office
- Potter, K.N., H.A. Torbert, H.B. Johnson et C.R. Tischler, 1999, Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils. *Soil Science*, 164, pp. 718-725
- Pregitzer, K.S. et A.L. Friend, 1996, The structure and function of *Populus* root systems. In *Biology of Populus and its implication for management and conservation*, R.F. Stettler, H.D. Bradshaw Jr., P.E. Heilman et T.M. Hinckley (éditeurs), NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada, pp 331-354.
- Rytter, R-S. et L. Rytter, 1998, Growth, decay, and turnover rates of fine roots of basket willows, *Canadian Journal of Forest Research*, 28, pp. 893-902
- Rytter, R.-S., 2013, The effect of limited availability of N or water on C allocation to fine roots and annual fine root turnover in *Alnus incana* and *Salix viminalis*. *Tree Physiology*, 33, pp. 924-939
- Sartori, F., R. Lal, M.H. Ebinger et D.J. Parrish, 2006, Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25, pp. 441-472
- Six, J., E.T. Elliott et K. Paustian, 1999, Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems, *Soil Science Society of America Journal*, 63, pp. 1350-1358
- Tate, K.R., N.A. Scott, D.J. Ross, A. Parshotam et J.J. Claydon, 2000, Plant effects in soil carbon storage and turnover in a montane beech (*Nothofagus*) forest and adjacent tussock grassland in New Zealand, *Australian Journal of Soil Research*, 38, pp. 685-698
- VandenBygaart, A.J., E.G. Gregorich et D.A. Angers, 2003, Influence of agricultural management on soil organic carbon : A compendium and assessment of Canadian studies, *Canadian Journal of Soil Science*, 83, pp. 363-380
- Van Veen J.A. et P.J. Kuikman, 1990, Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms, *Biogeochemistry*, 11, pp. 213-233
- Wilson, B.R., T.B. Koen, P. Barnes, S. Ghosh et D. King, 2011, Soil carbon and related soil properties along a soil type and land-use intensity gradient, New South Wales, Australia, *Soil Use and Management*, 27, pp. 437-447

Young, R., B.R. Wilson, M. McLeod et C. Alston, 2005, Carbon storage in the soils and vegetation of contrasting landuses in northern New South Wales, Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 43, pp. 21-31

Zan, C.S., J.W. Fyles, P. Girouard et R.A. Samson, 2001, Carbon sequestration in perennial bioenergy, annual corn and uncultivated systems in southern Quebec. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 86, pp. 135-144

Zhang, S.Y., Q.B. Yu, G. Chauret et A. Koubaa, 2003, Selection for both growth and wood properties in hybrid poplar clones, *Forest Science*, 49, pp. 901-908

Pour citer cet article

Référence électronique

Martine Routhier, Benoit Lafleur et Nicolas Bélanger, « Accumulation des stocks de carbone dans les sols sous des cultures bioénergétiques de *Populus* spp., *Salix* spp. et *Panicum Virgatum* », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 2 | septembre 2014, mis en ligne le 16 septembre 2014, consulté le 08 octobre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15076> ; DOI : 10.4000/vertigo.15076

À propos des auteurs

Martine Routhier

UER Science et Technologie, Téléuq, Université du Québec, 5800 rue Saint-Denis, Bureau 1105, Montréal (Québec), Canada H2S 3L5

Benoit Lafleur

Centre d'étude de la forêt, Université du Québec à Montréal, Département des sciences biologiques, 141 Avenue du Président-Kennedy, Montréal (Québec), Canada H2X 1Y4, Courriel : benoit.Lafleur@uqat.ca

Nicolas Bélanger

UER Science et Technologie, Téléuq, Université du Québec, 5800 rue Saint-Denis, Bureau 1105, Montréal (Québec), Canada H2S 3L5

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

À l'échelle mondiale, les sols contiennent environ 2000 Gt de carbone (C). Au cours des derniers siècles, l'aménagement des sols a toutefois contribué à la libération vers l'atmosphère de près de 140 Gt de C. L'établissement de certaines cultures sur des terres marginales pourrait néanmoins réduire le C atmosphérique en l'accumulant dans le sol. Cette étude a pour objectif d'identifier les effets de la texture du sol, de l'affectation historique du territoire et du temps écoulé depuis la mise en culture sur l'accumulation du C organique dans le sol (COS) sous deux espèces ligneuses (*Populus* spp. et *Salix* spp.) et une espèce herbacée (*P. virgatum*). Dans l'ensemble, sur d'assez courtes périodes (moins de 20 ans), nos résultats indiquent que le COS de la majorité des sites sous ces cultures est de 5 à 20 % plus élevé que l'affectation préalable. Sous les cultures d'espèces ligneuses et sous *P. virgatum*, les sites dont la teneur en argile est >20 % avaient des stocks de COS 10 à 20 % plus élevés que les sites témoins, alors que cette différence s'élevait à environ 5 % pour les cultures dont la teneur des sols en argile est <20 %. Par ailleurs, l'établissement de cultures d'espèces ligneuses sur des terres cultivées et sur des prairies et pâturages a entraîné une augmentation de COS de l'ordre de 4 % et 19 %, respectivement. En ce qui a trait à *P. virgatum*, son établissement sur des terres cultivées a entraîné une augmentation de COS de 12 %, alors que la conversion à partir de prairies et pâturages a entraîné une augmentation de 5 % seulement. Enfin, l'âge des cultures d'espèces

ligneuses a eu peu d'effets sur les stocks de COS, mais les cultures de *P. virgatum* de <5 ans et >5 ans avaient respectivement des stocks de COS 5 % et 11 % supérieurs aux témoins. Les résultats suggèrent que l'accumulation du C dépend de plusieurs facteurs, dont : (1) les argiles qui favorisent la formation de composés organo-minéraux chimiquement stables qui protègent physiquement le carbone de l'activité bactérienne, (2) le labour du sol sous un régime intensif de cultures annuelles qui peut avoir fait perdre du COS sur plusieurs années, offrant donc un plus grand potentiel d'accumulation par la nouvelle culture, (3) le profil racinaire qui, selon l'espèce, enrichit le sol en C à différentes profondeurs, et (4) la quantité de biomasses produite et la vitesse de ces gains, lesquelles dictent l'importance des flux de C au sol, à court et moyen termes.

Globally, soils contain about 2000 Gt of carbon (C). Over the past centuries, however, land use has contributed to the release of about 140 Gt of C to the atmosphere. Nonetheless, the establishment of crops on marginal lands could reduce atmospheric C by accumulating it in soils. This study aimed to identify the effects of soil texture, land use history and time following cultivation on soil C accumulation since the establishment of two woody species (*Populus* spp. , and *Salix* spp.) and one herbaceous species (*Panic virgatum*). Overall, over relatively short periods of time (less than 20 years), our results indicate that these cultures accumulate a considerable amount of soil organic carbon (SOC) compared to previous land uses. Under woody species and *P. virgatum*, sites with clay content >20 % had SOC stocks 10-20 % higher than control sites, whereas this difference was approximately 5 % for crops with soil clay content <20 %. Moreover, the establishment of woody crops on former croplands as well as grasslands and pastures resulted in an increase in SOC of about 4 % and 19 %, respectively. The establishment of *P. virgatum* on farmlands resulted in a 12 % increase in SOC stocks, while the conversion from grasslands and pastures resulted in an increase of only 5 %. Finally, the age of the cultures of woody species had little effect on SOC stocks, whereas the cultures of *P. virgatum* <5 years and >5 years had COS stocks 5 % and 11 % higher than the control sites, respectively. The results suggest that C accumulation depends on several factors, including : (1) soil clay content, which promotes the formation of chemically stable organo-mineral compounds that physically protect C from bacterial activity, (2) soil tillage under intensive annual cultures which may have resulted in COS loss over several years, thus providing greater accumulation potential in the new culture, (3) the root profile which, depending on species, increases soil C at different depths, and (4) the amount of biomass produced, which dictates the importance of C fluxes to the soil in the short- and mid-term.

Entrées d'index

Mots-clés : Affectation du territoire, historique, carbone, sol, culture bioénergétique, panic érigé, peupliers, saules, accumulation, texture

Keywords : bioenergy crop, carbon, accumulation, land use, history, poplar, soil, texture, switchgrass, willow

Lieux d'étude : Amérique du Nord