

# ÉVALUER LE STOCK DE CARBONE DANS LES SOLS DES PRINCIPES À NE PAS PERDRE DE VUE, UNE MÉTHODE SIMPLIFIÉE

Évaluer le stock de carbone organique du sol est devenu une activité de service à laquelle de nombreux acteurs se consacrent. Cette question est portée par les stratégies climat, depuis que la Cop21, en lançant l'initiative « 4 pour 1000 », a popularisé le potentiel de séquestration de carbone organique dans les sols comme une des technologies de séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique les plus prometteuses. Mais évaluer le stock de carbone dans les sols n'est pas si simple, rien qu'en matière de matériel utilisé, manière d'échantillonner, etc. Une équipe de recherche en Suisse a refait le point et nous livre ses conclusions.

## La séquestration de carbone dans les sols

Rappelons tout d'abord brièvement le mécanisme sous-jacent. Le CO<sub>2</sub> atmosphérique est capté par les plantes par photosynthèse. Les plantes exsudent différents métabolites en grande quantité dans le sol et leurs résidus s'y décomposent. Beaucoup d'organismes vivants, microbiens ou non, participent à cette décomposition en se nourrissant de cette matière. L'ensemble, en se décomposant, va en partie contribuer à former de

l'humus, soit une matière organique relativement stable, composée à 60 % de carbone, qui se lie particulièrement aux minéraux argileux du sol et donne à l'horizon de surface sa couleur brune typique. La matière organique des sols a des âges variant de quelques semaines à 4000 ans, cet âge étant croissant avec la profondeur : 80 % du renouvellement se produit dans les 30 premiers centimètres à une échelle de 50 ans.

Les sols cultivés sont globalement très déficitaires en hu-

mus – que nous appellerons « matière organique du sol » (MO) –, en lien avec l'intensification de l'agriculture. Ce déficit est un grand problème pour la qualité des sols, mais un avantage si l'on peut le combler. En créant de la matière organique stable à partir de la photosynthèse, on effectue bien un piégeage du CO<sub>2</sub> qui va être stocké dans les sols. Si ce stockage est stable (par convention, on considère une échelle de 20 à 30 ans), et s'il provient de la photosynthèse sur place (le déplacement de

matière organique d'un point à un autre ne rentre donc pas dans ce cadre), on parle alors de séquestration de CO<sub>2</sub>. La séquestration a donc une définition stricte, tout stockage n'est pas une séquestration. Le potentiel de séquestration des sols est très grand (d'autant plus que les sols sont déficitaires en MO) ; l'initiative « 4 pour 1000 » a frappé les esprits en estimant que si l'on parvenait à augmenter la teneur en matière organique des sols mondiaux de 1/4 000 chaque année

**TCS**  
Techniques Culturales Simplifiées

LA REVUE SPÉCIALISTE DES AGRO-ÉCOLOGIES INNOVANTES

TCS vous raconte  
comment  
les vers de terre  
concentrent  
la fertilité des sols

65€



Abonnez-vous !



www.agriculture-de-conservation.com

### BULLETIN D'ABONNEMENT

À adresser à Média et Agriculture - Service Abonnement - BP 90146 - 57004 METZ Cedex 1  
Tél. : 03 87 69 89 75 - abonnements@groupe-atc.com

- OUI**, je m'abonne pour 1 an à **TCS** (5 n<sup>OS</sup>)  
au tarif de **65€** au lieu de ~~70€\*~~
- OUI**, je m'abonne pour 1 an à **TCS** (5 n<sup>OS</sup>)  
**+ Cultivar** (11 n<sup>OS</sup> dont 2 hors-séries)  
au tarif de **105€** au lieu de ~~186,50€\*~~

- Je règle par chèque à l'ordre de Média et Agriculture.  
 Je souhaite recevoir une facture. (envoyée par e-mail uniquement)

Société : .....

Activité : .....

M.  Mme Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : .....

Ville : .....

Téléphone : .....

E-mail : .....

@ .....

Signature obligatoire :

Attention aucun abonnement ne sera enregistré sans l'accompagnement de votre règlement.

### Pour mieux vous connaître :

1 Date de naissance : \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

2 Productions : .....

3 SAU : .....

\* Valeur au numéro (TVA 2,1 %). Vous pouvez acquérir chaque numéro de TCS au tarif de 14 €, chaque numéro de Cultivar au tarif de 8,50 € et ses hors-séries au prix de 20 €, frais de port en sus. Tarifs valables en France métropolitaine, Belgique, Luxembourg, Suisse. Pour l'étranger, nous consulter au +33 (0)3 87 69 89 75. Offre valable jusqu'au 31/12/2023. Les informations recueillies par la société Média et Agriculture ont pour finalité la gestion de votre abonnement et peuvent être utilisées à des fins de marketing direct. Conformément à loi « informatique et libertés » du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant et vous pouvez vous opposer à leur cession en écrivant à l'adresse d'envoi du bulletin. Si vous souhaitez recevoir des propositions de nos partenaires, cochez cette case.

(stock de l'année 2 = stock de l'année 1 x 1,004), cela compenserait en théorie les émissions planétaires de source fossile. Parmi les technologies de séquestration proposées par la Cop21, l'European Academies' Science Advisory Council (2018) affirme que celle-ci est la seule à être immédiatement déployable, avec des co-effets positifs (maximiser les fonctions des sols), à moindre coût et en faisant appel aux techniques de l'agriculture de conservation. De nombreux acteurs publics et privés se sont alors tournés vers cette opportunité, notamment en envisageant de généraliser la régénération des sols, ce qui passe par la restauration de leur teneur en MO. On comprend que, pour évaluer le bilan de ces actions, il faut pouvoir suivre l'évolution des stocks de MO du sol, donc mesurer le stock à deux dates successives, en s'assurant que la différence n'est pas due au hasard, c'est-à-dire en connaissant la précision de la mesure et le changement minimum détectable (MDC). Ce dernier doit être suffisamment petit pour qu'un changement soit détectable dans un temps raisonnable. Or ceci n'a rien de trivial, il est nécessaire de résoudre quelques complications pour y parvenir.

### Évaluer le stock de carbone du sol : une route pavée de pièges

Compte tenu de ce qui précède, le Giec recommande un suivi du stock sur les 30 premiers centimètres de sol (ce qui ne représente que 50 % du stock environ, mais 80 % de l'évolution sur 50 ans). Mais suffit-il de prélever des échantillons sur 30 cm à deux temps différents ? Un ensemble de difficultés techniques se posent, rappelons-les en se focalisant sur la couche 0-30 cm.

■ La teneur en MO est évaluée par analyse de la terre

fine, c'est-à-dire du sol tamisé à 2 mm ; on enlève donc la fraction grossière avant de procéder à l'analyse. Mais la fraction > 2 mm trouvée dans un échantillon ne représente pas la proportion de ces éléments grossiers au champ, qui peut contenir des pierres et même des blocs. Évaluer le stock de carbone suppose donc de connaître le volume des éléments grossiers dans la couche 0-30 cm.

■ La teneur en MO du sol est exprimée en pourcentage de sa masse. Or on cherche à connaître le stock sur un volume (ici 0-30 cm). Il faut donc connaître la densité apparente ( $D_a$ , masse volumique) du sol échantillonné pour transformer le résultat de l'analyse en stock ( $\text{g cm}^{-3}$ ) dans le volume considéré. Or la mesure de  $D_a$  est peu précise, fastidieuse et coûteuse. Une solution élégante est d'utiliser une gouge de prélèvement, dont on connaît la section, ce qui permettrait de savoir quelle masse de sol est prélevée dans un certain volume.

■ Le volume du sol (et donc l'épaisseur de la couche 0-30 cm par exemple) change au cours du temps, sous l'action du travail du sol (compaction et décompaction), du changement de teneur en MO (qui augmente la porosité) et de l'état hydrique (gonflement retrait). Se contenter de prélever la couche 0-30 cm ne convient donc pas : il y a de fortes chances que l'on ne prélève en fait pas la même couche, puisqu'elle a changé d'épaisseur. C'est pourquoi la recherche a montré qu'il fallait travailler non pas à profondeur constante, mais à masse de sol prélevé constante : c'est la méthode ESM (Equivalent Soil Mass), dont la variante la plus simple est proposée par Wendt and Hauser (2013). Cependant, même la version simplifiée pour la seule estimation de

la couche 0-30 cm nécessite de prélever et d'analyser aussi quelques centimètres à la base de cette couche, ce qui permettra de disposer d'un facteur de correction de la masse de sol échantillonnée afin de rendre compte d'une masse équivalente à celle du premier prélèvement. Ceci représente un coût non négligeable.

■ La méthode ESM est proposée en utilisant la gouge pour prélever et donc éviter de devoir faire des mesures de  $D_a$ . Les gougues équipent notamment les préleveurs hydrauliques automatisés montés sur des engins mobiles (en général des Quads) et utilisés par les prestataires de services analytiques, notamment pour calculer le stock et établir des crédits  $\text{CO}_2$ . Manuelle ou mécanisée, la gouge doit permettre de mesurer correctement la  $D_a$  du sol, elle doit donc extraire correctement le volume de sol perforé, faute de quoi le bilan de masse sera faux, et donc le stock également. Cette vérification n'a à notre connaissance pas été faite.

■ Afin d'échantillonner correctement, il faut déterminer combien de prélèvements doivent être réalisés sur une parcelle, et selon quel schéma de prélèvement, pour représenter avec une précision suffisante le stock du sol.

À notre connaissance, les prestataires privés qui émettent des certificats carbone ne tiennent pas compte de ces difficultés et de ces règles. La pratique courante inclut prélèvement à profondeur constante, utilisation de valeurs de densité apparente constante, non prise en compte de la teneur en éléments grossiers notamment. Ceci au risque d'émettre des certificats carbone si erronés qu'ils en seraient nuls et non avendus. Or les erreurs associées à ces approximations ne sont pas précisées.

### Objectifs et expérimentation

Prométerre, la chambre d'agriculture vaudoise, a souhaité prendre à son compte l'émission de certificats carbone des agriculteurs du canton de Vaud. Les objectifs du travail que nous avons effectué à sa demande étaient :

- de tester les méthodes de prélèvement par gouge, particulièrement diamètre de la gouge et mise en œuvre manuelle ou mécanisée ;
  - de déterminer le mode d'échantillonnage offrant le meilleur compromis entre précision et coût ;
  - de proposer une évaluation au champ de la teneur en éléments grossiers et de déterminer l'incidence de cette évaluation sur les erreurs de calcul du stock ;
  - de simplifier la méthode ESM pour réduire les coûts de prélèvement et d'analyse ;
  - de déterminer les erreurs associées à toutes ces étapes et d'en déduire le changement minimum de stock détectable, ainsi que le temps de retour sur une parcelle pour mesurer un changement détectable. Pour cela, des échantillonnages systématiques ont été effectués à différentes échelles :
  - tests de remplissage de la gouge manuelle, pour déterminer si la carotte prélevée doit être arrasée ou non en vue d'une meilleure reproductibilité ;
  - échantillonnage intensif de deux parcelles pour déterminer la variabilité de l'évaluation du stock selon le nombre d'échantillons et le plan d'échantillonnage ;
  - échantillonnage de 403 parcelles avec des gougues de différents diamètres, mécanisées ou non. Test des masses de sol prélevées ;
  - mesures visuelles de la teneur en éléments grossiers sur test bêche.
- La simplification de la méthode ESM a été envisagée de

la façon suivante :

- il est nécessaire a priori d'échantillonner la couche 0-30 cm et celle à sa base. Cette seconde couche est mince, elle doit être suffisamment épaisse pour permettre de prendre en compte le changement d'épaisseur de la couche 0-30 cm, qui est au maximum de l'ordre de 3 cm ;
- cette seconde couche est sous la semelle de labour, sa teneur en MO est faible, sa Da est moins variable que dans la couche supérieure : on peut faire l'hypothèse que remplacer la valeur mesurée par une moyenne locale introduirait une erreur faible ;

- pour estimer cette erreur, nous avons procédé à l'échantillonnage de deux couches (méthode ESM), soit 0-30 cm et 30-35 cm, et au calcul des valeurs moyennes de stock sur la couche 30-35, puis comparé l'erreur introduite en remplaçant la valeur exacte de stock de cette couche par une valeur moyenne, sur le terme correctif et donc l'erreur sur les stocks.

La propagation des différentes erreurs ci-dessus permet de connaître l'erreur globale sur le stock intégrant toutes les erreurs et de déterminer le changement minimum détectable correspondant, et donc le temps de retour minimum pour qu'un changement soit détectable. Les résultats détaillés de cette étude figurent dans un article de revue scientifique. Les conclusions principales sont données ici. Les parcelles échantillonnées étaient distribuées sur le territoire du canton et cultivées en grandes cultures.

**Méthode de prélèvement et plan d'échantillonnage**  
**Bonne précision de la mesure manuelle**

Les essais préliminaires ont montré que la carotte devait être arrasée à l'extraction de la gouge. L'opérateur a pour consigne de vérifier la conti-

nuité de la carotte à l'extraction (gouge pleine), le prélèvement sera refait le cas échéant. Les gougues manuelles procurent alors une excellente estimation des densités apparentes par comparaison à nos données régionales. Il n'y a pas de différence significative entre les gougues de différent volume intérieur.

**Échec du préleveur hydraulique mécanisé**

Les masses de sol obtenues avec le préleveur mécanisé donnent des densités apparentes non corrélées avec les mesures directes et irréalistes (en moyenne de 0,5 au lieu de 1,25 g cm<sup>-3</sup>).

Dans la suite de ce travail, nous avons exclu le préleveur mécanisé qui ne permet pas d'effectuer des mesures de stocks en raison d'une grande erreur sur la masse prélevée. Comme déjà trouvé pour la teneur en MO, le schéma en croix selon les deux diagonales de la parcelle (plan d'échantillonnage), avec 20 échantillons de gouge au total, s'avère le meilleur compromis entre précision et simplicité.

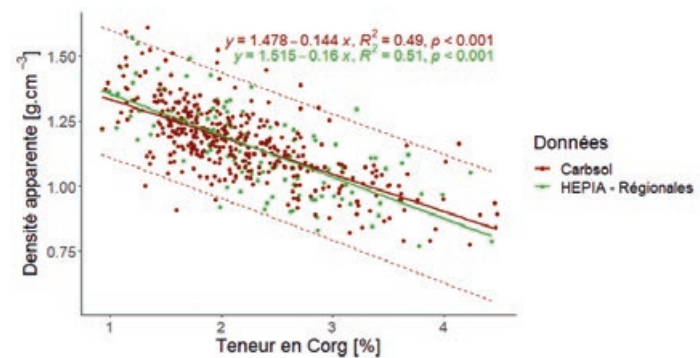
L'opérateur effectue 20 prélèvements qui sont mélangés dans un seau. L'ensemble de l'échantillon est pesé (masse sèche après tamisage des grossiers) et une analyse de teneur en MO est effectuée.

**Estimation de la teneur en éléments grossiers**

Le calcul de la variance de la mesure du stock de carbone due à l'estimation des éléments grossiers montre une forte augmentation de la variance avec le pourcentage des éléments grossiers (figure 2). Cette estimation gagnerait à être améliorée car elle peut fortement pénaliser la précision de la mesure du stock. Ceci se traduit en effet par un temps de détectabilité du changement qui augmente avec le pourcentage de grossier d'autant plus que le taux



FIGURE 1 : VALEURS DE DENSITÉ APPARENTE DÉTERMINÉES À LA GOUGE (ROUGE - CARBSOL) COMPARÉES AUX MESURES DIRECTES EFFECTUÉES DANS LA RÉGION



**POUR UNE FOIS que les fissures ont DU BON!**

- CASSE LA SEMELLE DE LABOUR
- CARBURE HAUTE RÉSISTANCE
- TRAVAIL EN PROFONDEUR
- LIT DE SEMENCE OPTIMAL
- TERRE FINE ET FRAÎCHE
- RESPECTE LA VIE DU SOL

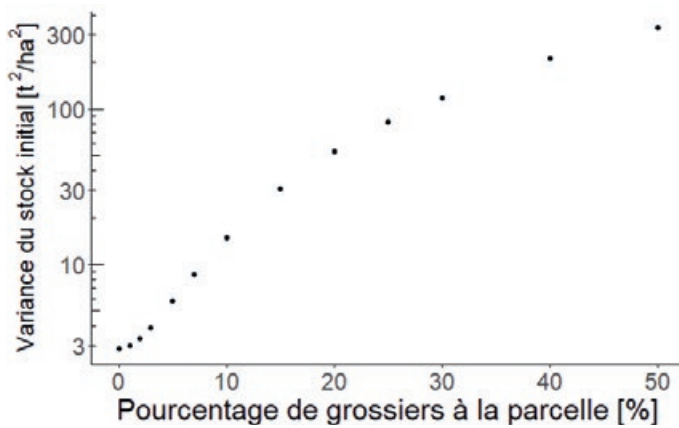
Grâce à l'Optimus breveté, votre déchaumeur devient un fissurateur!

**CARBURE TECHNOLOGIES**  
 Les alliances réussies

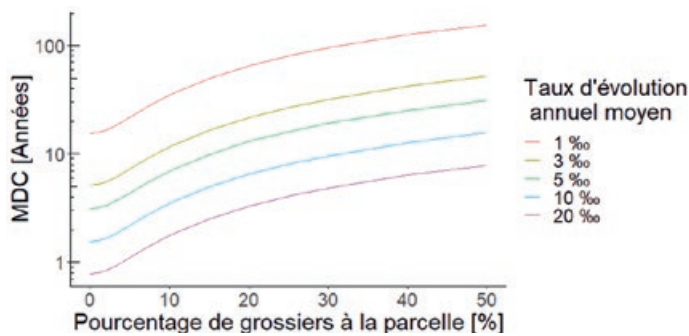
Z.A. La Grande Verrerie  
 Meigné Le Vicomte  
 F - 49490 Noyant Villages  
 www.carbure-technologies.fr

**TEL: 02 41 82 58 78 • 06 85 69 09 71 •**

**FIGURE 2 : VARIANCE DU STOCK INITIAL EN FONCTION DU POURCENTAGE DE GROSSIERS SUR LA PARCELLE**



**FIGURE 3 : MDC DU STOCK INITIAL (0-30 CM) EN T.HA<sup>-1</sup> SELON LE POURCENTAGE VOLUMIQUE D'ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA PARCELLE ET LE TAUX D'ÉVOLUTION ANNUEL MOYEN, POUR UN STOCK INITIAL DE 67 T.HA<sup>-1</sup>**



d'évolution du stock est faible (figure 3).

### Variance de la méthode ESM et de la méthode simplifiée

La méthode ESM utilise un terme correctif sur la masse de sol. Ce terme est mesuré sur la couche sous-jacente. Sur la figure 4, on observe que la variance d'estimation du stock augmente avec l'importance du terme correctif.

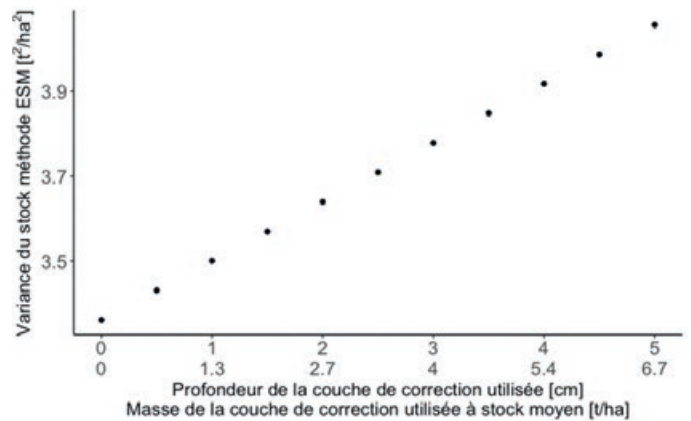
Le fait d'utiliser des propriétés moyennes pour ce terme correctif et non pas la valeur mesurée introduit une erreur supplémentaire qui est reportée en figure 5.

### Changement minimum détectable selon la méthode employée

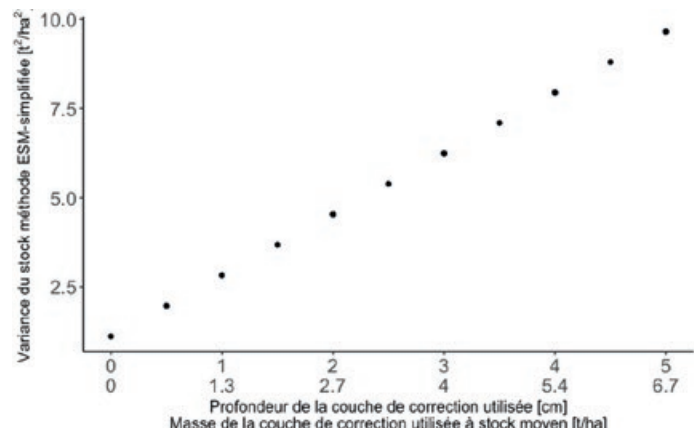
La détectabilité du changement de stock peut s'évaluer en année avant retour sur la parcelle, en fonction de la méthode pratiquée et du taux d'évolution de la teneur en MO. La figure 6 et

la figure 7 synthétisent cette information. On voit que travailler à profondeur et à Da constantes (et non pas à masse constante) n'est pas une option : pour un stock moyen, il faut des taux d'évolution de 20 à 30 ‰ pour que le changement soit détectable à 10 ans. La simplification de la méthode ESM a peu d'impact sur la détectabilité, même si cet impact augmente avec l'importance du terme correctif, c'est-à-dire de la variation de masse dans la couche 0-30 cm, reflet du changement d'épaisseur de cette couche. Toutefois, il est peu probable qu'un terme correctif de plus de 2 cm soit nécessaire. Les méthodes ESM et ESM simplifiée permettent une détectabilité à moins de 10 ans pour la plupart des parcelles suivies, à moins de 5 ans pour environ la moitié d'entre elles en se basant sur les taux d'évolution déterminés par Dupla et al., 2021.

**FIGURE 4 : VARIANCE DE L'ESTIMATION DU STOCK AVEC LA MÉTHODE ESM SELON L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE CORRECTION UTILISÉE**



**FIGURE 5 : VARIANCE DU STOCK DU TERME CORRECTIF AVEC LA MÉTHODE ESM SIMPLIFIÉE SELON L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE CORRECTION UTILISÉE**

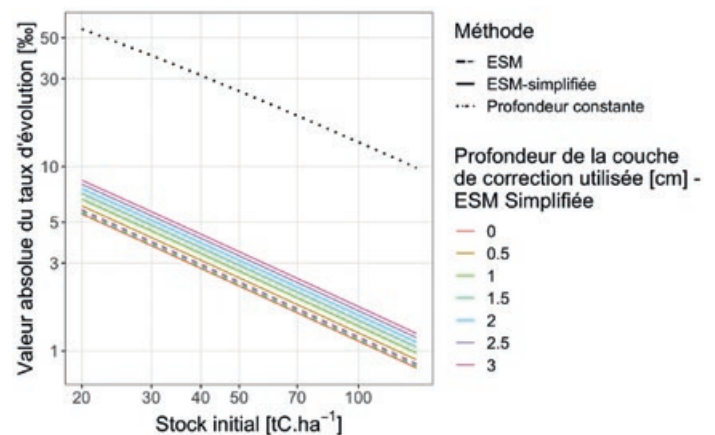


### Conclusions

Les premières conclusions de cette étude interpellent les pratiques de certification. Il est absolument nécessaire pour un suivi des stocks de travailler en masse de sol équivalente (ESM) et non à profondeur

constante. C'est malheureusement par un échantillonnage à profondeur constante que sont évalués les certificats carbone. De plus, les préleveurs mécanisés sont inadaptés pour effectuer des bilans de stock : ils ne prélèvent pas des carottes com-

**FIGURE 6 : VALEUR ABSOLUE DU TAUX D'ÉVOLUTION ANNUEL MOYEN NÉCESSAIRE POUR UN MDC DE 10 ANS SELON LE STOCK INITIAL POUR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES ET SELON LA PROFONDEUR DE COUCHE DE CORRECTION UTILISÉE (ÉCHELLES LOGARITHMIQUES)**





Dès que l'émergence de la possibilité de créditer le carbone stocké dans les sols agricoles est apparue, la difficulté d'en mesurer l'évolution a rapidement été mise en avant, comme le démontre cet article.

Outre la complexité des mesures de laboratoire, comme pour toutes les analyses, la qualité de l'échantillonnage est un préliminaire important où de nombreux biais peuvent déjà se glisser. La notion de temps est également un obstacle important. Même si 5 ans, voire 10 ans, peut sembler long, ce n'est rien au regard de cette fraction du sol qui est cependant si importante par ses fonctionnalités. Enfin tous ces efforts auront du mal à intégrer la qualité de ces matières organiques qui peuvent être, elles aussi, très variables. En d'autres termes, il faut admettre que l'on pourra approcher des variations mais sans vraiment de précisions !

Pour ce qui est maintenant des crédits ou certificats carbone, beaucoup de prestataires, pour éviter de vendre du « vent », utilisent des modèles et des mesures/calculs qui tendent à minimaliser les va-

riations. De plus, en ignorant le carbone en dessous de 30 cm, qui peut représenter jusqu'à 50 % du stock total et sur lequel l'ACS peut avoir un impact favorable, ils réduisent encore plus les risques de surévaluations. Enfin ils parient sur une forme d'annulation des erreurs entre les parcelles et les agriculteurs en travaillant sur des moyennes.

D'autres, plus prudents, se concentrent sur seulement le bilan en considérant ce qui entre dans le sol (couverts végétaux, résidus de récolte...) et ce qui ressort du système. Il s'agit là d'une approche plus simpliste, qui, comme les autres, possède nombre de biais et d'approximations. Enfin la grande majorité des prestataires continue de faire évoluer leurs modèles et approches en fonction de l'évolution des connaissances.

Il est clair que la séquestration du carbone est un sujet très récent mais ces difficultés, somme toute bien réelles, ne doivent pas faire obstacle aux avancées et même aux premières transactions. Passer d'une politique de moyens à une politique de résultats est certes un processus ambitieux et compliqué, mais sans avoir une mesure exacte,



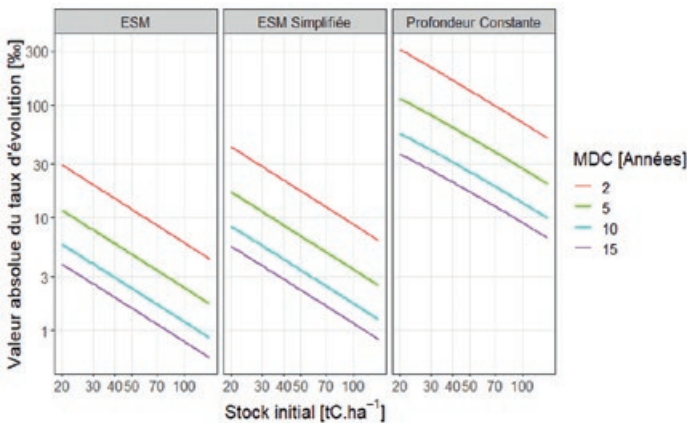
F. THOMAS

L'orientation est déjà un super stimulant pour encourager des pratiques agricoles qui vont dans la bonne direction pour les sols, l'environnement et même la planète !

Frédéric THOMAS

**FIGURE 7 : VALEUR ABSOLUE DU TAUX D'ÉVOLUTION ANNUEL MOYEN NÉCESSAIRE POUR DIFFÉRENTS MDC EN FONCTION DU STOCK INITIAL**

Pour les méthodes ESM, la profondeur de la couche de correction utilisée est de 3 cm (échelles logarithmiques).



plètes (erreurs d'un facteur 2) et ne permettent donc pas d'appliquer la méthode ESM.

La deuxième conclusion est que la méthode ESM peut être simplifiée – dans les conditions de cette étude – sans pénaliser la détectabilité des changements de manière significative. Le coût de l'évaluation du stock s'en trouve fortement réduit (un seul prélèvement par analyse).

La troisième observation est que l'amélioration de la détermination au champ de la teneur en éléments grossiers permettrait de fortement gagner en détectabilité des chan-

gements de stock dans le cas où le pourcentage volumique d'éléments grossiers (> 2 mm) dépasse les 10 %.

Enfin, dans le but de pouvoir faire des prélèvements mécanisés, une recherche en mécanique doit être effectuée pour que de futurs préleveurs soient compatibles avec l'application de la méthode ESM.

Téo LEMAÎTRE, Julien CLARCK, Cédric DELUZ et Pascal BOIVIN, HEPIA Agronomie Suisse pascal.boivin@hes-so.ch

Les auteurs remercient Prométerre et la responsable du programme carbone Aude Jarabo pour leur confiance et le soutien financier à ce travail.



**GRANGE**  
MACHINERY

**FISSURATEURS FAIBLE PERTURBATION**  
Gamme polyvalente



stecomat.com - 0553 980 110  
ejansingh@stecomat.com  
ZA Roubiague 47390 Layrac

