

02

Effets à long terme

Gérer le stock de carbone du sol

Dans les zones de grande culture, les pailles de blé et d'orge sont majoritairement restituées au sol. Elles pourraient trouver une valorisation industrielle en substitution aux énergies fossiles. Mais cette pratique risque d'appauvrir les sols en matière organique. Jusqu'où peut-on exporter de façon durable ?



▲ À l'heure actuelle, la plus grande partie des pailles produites en grande culture retourne au sol.

Les matières organiques des sols (MOS) assurent de nombreuses fonctions environnementales : elles participent à la fertilité du sol, le protègent de l'érosion, améliorent ses propriétés physiques, lui permettent de piéger certains polluants et participent au cycle

des gaz à effet de serre. Il est donc logique d'apporter autant d'attention à la matière organique dans les sols qu'aux autres paramètres de sa fertilité. La capacité de stockage du carbone dans le sol à partir de résidus végétaux dépend à la fois de la nature de la culture et des résidus qu'elle produit (parties aériennes, racines, exsudats...) ainsi que du type de sol. Les cultures annuelles contribuent moins que les forêts et prairies à stocker du carbone, y compris en zones de culture intensive.

Dans les zones de grande culture, les pailles de céréales

constituent une source importante de lignocellulose riche en énergie.

Actuellement, la plus grande partie de ces pailles retourne au sol, donnant lieu à la production de composés humiques lors de leur biodégradation. Pour déterminer la part des pailles qui peut être prélevée sans dommage pour la fertilité des sols, il faut se référer aux résultats des essais de longue durée, réaliser des inventaires régionaux sur les stocks et leur évolution et mettre en œuvre des modèles de simulation des stocks de matière organique des

sols. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre du programme Cartopaille en Picardie.

Un modèle de simulation fiable

Le modèle utilisé, appelé AMG, est un modèle simple dérivé du modèle Hénin-Dupuis. Il simule l'évolution du carbone organique du sol qui représente en moyenne 58 % des MOS (*encadré 1*).

▶ Les données recueillies dans l'Aisne ont permis de valider le modèle de simulation.

Bruno Mary
Bruno.Mary@laon.inra.fr

INRA

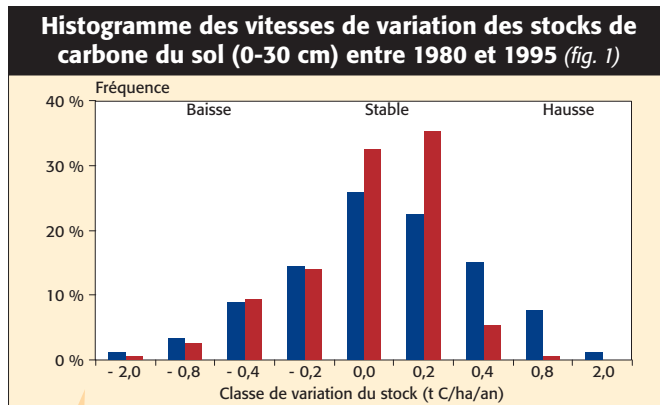
Kawtar Saffih-Hdadi
Annie Duparque
Vincent Tomis
Agro-Transfert Picardie

Le modèle a été évalué régionalement avec deux bases de données d'analyses de terre concernant des parcelles de grande culture du département de l'Aisne (fournies par le LDAR¹). La première base de données concerne 382 parcelles qui ont été analysées plusieurs fois dans la période 1975-1997. Elle révèle que pour environ la moitié d'entre elles, les variations de stock étaient comprises entre -0,2 et +0,2 t C/ha/an, ce qui correspond à peu près à l'équilibre organique (figure 1). Dans 28 % des situations, le stock avait baissé et dans 24 % augmenté. Le modèle reproduit assez bien ces évolutions (barres rouges), bien qu'il simule trop de situations stables et pas assez de situations en hausse. En moyenne, le stock de carbone (calculé sur une profondeur de 28 cm) a peu varié: il est passé de 39,0 t/ha en 1980 à 38,3 t/ha en 1995 (figure 2).

La deuxième base de données porte sur un plus grand nombre de parcelles (1970) analysées une seule fois entre 2000 et 2005, et représentatives des mêmes situations de sols et de cultures.

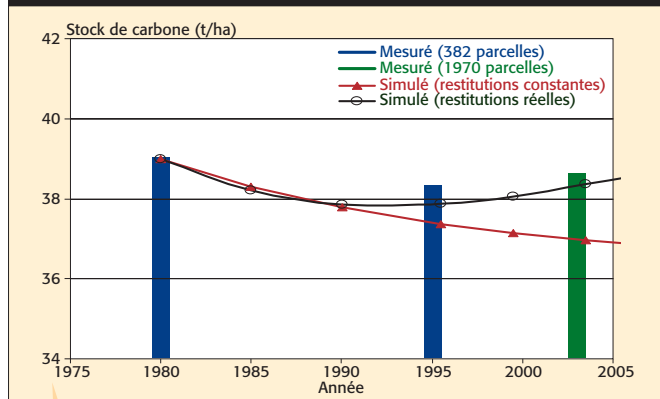
Des conditions froides ou des sols argileux conduisent aux plus fortes diminutions de stock de carbone si les pailles sont exportées.

Le stock moyen observé en 2003 est de 38,6 t/ha. Cette évolution (décroissante puis légèrement croissante) est mal simulée si l'on considère que les restitutions de matière organique ont été constantes (figure 2 courbe rouge). Elle est par contre bien simulée par le modèle lorsqu'on prend en compte l'augmentation



Les stocks de carbone sont restés stables dans la moitié des situations analysées dans l'Aisne entre 1980 et 1995. Le modèle simule assez bien leur évolution.

Evolution du stock de carbone du sol (0-28 cm) dans des parcelles de l'Aisne sur 25 ans (fig. 2)



Dans l'Aisne, le stock moyen de carbone du sol est passé de 39,0 t/ha en 1980 à 38,6 t/ha en 2003. La hausse des rendements observée depuis la fin des années 1980 explique cette faible variation.

Un modèle pour simuler l'évolution de la matière organique (enc. 1)

Le modèle AMG distingue la matière organique fraîche (résidus de culture, amendements organiques) et la matière organique humifiée. Celle-ci se compose d'une fraction active ayant un temps de renouvellement de l'ordre de 20 ans, et une fraction stable beaucoup plus résistante à la biodégradation (considérée comme inerte sur une durée de 50 ans). Le modèle fait intervenir trois paramètres: la proportion de carbone stable, le taux d'humification des résidus organiques et le coefficient de minéralisation de la matière organique active. Le taux d'humification dépend de la nature des résidus organiques apportés tandis que le coefficient de minéralisation varie selon les conditions pédoclimatiques (type de sol, température et humidité). La proportion de carbone actif dépend de l'histoire culturale du sol et n'est pas facile à mesurer: la valeur recommandée va de 30 à 50 %. Le modèle requiert la connaissance des successions de culture, des rendements et des apports d'amendements pour estimer les restitutions de carbone par les résidus de culture aériens et souterrains, ainsi que des données sur les conditions pédoclimatiques et les techniques culturales.

© N. Cornec



La collecte d'une paille de céréale sur trois sur l'ensemble des parcelles de l'Aisne représenterait 220 000 tonnes de paille. ►

Résultats de huit essais internationaux sur l'exportation des pailles (tab. 1)

Site	Durée ans	C-paille exporté t/ha/an	Perte de C du sol		Variation de stock	
			observée t/ha/an	simulée t/ha/an	observée % apport	simulée % apport
Ultuna (Suède)	34	1,92	0,37	0,29	19 %	15 %
Askov (Danemark)	21	2,72	0,31	0,30	11 %	11 %
Grignon (France)	17	2,52	0,29	0,34	11 %	13 %
Boigneville (France)	12	1,52	0,21	0,25	14 %	16 %
Issoudun (France)	27	1,61	0,12	0,22	7 %	14 %
Doazit (France)	12	2,34	0,24	0,30	10 %	13 %
Serreslous (France)	20	2,23	0,17	0,21	8 %	10 %
Khon Kaen (Thaïlande)	26	1,84	0,08	0,04	4 %	2 %



© N. Cornec

Quelle que soit la situation, l'exportation des pailles conduit toujours à une diminution du stock de carbone du sol.

des restitutions (13 %) qui a résulté de l'augmentation des rendements des cultures observée entre 1988 et 2003 (figure 2 courbe noire).

Des essais de longue durée pour une vision à long terme

Pour obtenir des références à long terme sur l'effet de

l'exportation des pailles, nous avons analysé des résultats obtenus sur des essais de divers pays où étaient comparées exportation et restitution des pailles de céréales, sur une durée allant de 12 à 34 ans (tableau 1). Les huit essais retenus correspondent à des conditions de sol et de climat très variées. Quelle que soit

la situation, l'exportation de pailles conduit toujours à une diminution du stock de carbone. Cette diminution va de 0,08 à 0,37 t/ha/an. Ceci représente de 4 à 19 % de l'apport cumulé de carbone par la paille. Les plus faibles diminutions ont été observées en conditions chaudes ou avec des sols sableux; inversement, les plus

Moins de 30 % des parcelles analysées dans l'Aisne ont enregistré une baisse du stock de matière organique depuis 1980. ▼



© N. Cornec

Un outil pour exporter sans risque (enc. 2)

Les résultats du projet Cartopaille ont permis d'estimer les quantités de paille potentiellement exportables à l'échelle du département de l'Aisne (près de 200 000 t/an), puis de l'ensemble de la région Picardie (près de 625 000 t/an), sans porter préjudice au statut organique des sols cultivés. Pour que la paille disponible soit réellement mobilisée, trois conditions s'imposent: (1) un prix d'achat attrayant pour l'agriculteur et garanti sur la durée du contrat; (2) une bonne structuration de la filière de collecte, de stockage et d'acheminement de la paille jusqu'à l'usine; (3) un outil de calcul qui permette à l'agriculteur de planifier la quantité de paille qu'il pourra exporter de façon durable sur chaque parcelle.

Cet outil a été élaboré dans le cadre du projet Gestion et Conservation de l'Etat Organique des sols agricoles de Picardie, conduit par Agro-Transfert Ressources et Territoires. Il se présente sous la forme d'un abaque indiquant la proportion exportable de pailles pour chaque « situation type » (croisant un système de culture et un type de sol). Le principe général retenu pour décider des possibilités d'exportation de la paille repose sur une double règle de décision: (1) limiter le déstockage de carbone organique du sol (critère environnemental); (2) éviter que la teneur en carbone organique du sol ne s'éloigne d'une valeur de référence décrite dans l'abaque (critère agronomique). L'étude mobilise l'outil de simulation de l'évolution à long terme des teneurs et des stocks de carbone organique des sols créé par Agro-Transfert, fondé sur le modèle AMG. Les documents sont consultables sur le site www.agro-transfert-rt.org

L'outil prend en compte à la fois des critères environnementaux et agronomiques pour limiter l'impact sur le stock de carbone organique des sols.



fortes diminutions apparaissent en conditions froides ou en sol argileux. Les simulations faites avec le modèle reproduisent assez fidèlement ces tendances d'évolution. La pertinence du modèle pour simuler les évolutions observées conduit à accorder du crédit aux résultats des scénarios pour lesquels il a été utilisé.

Une simulation jusqu'en 2050

Le modèle AMG a été utilisé pour simuler les conséquences d'exportation de la paille sur l'évolution des stocks de carbone organique dans le département de l'Aisne (*figure 3*). Différents scénarios d'exportation de la paille disponible (non utilisée pour l'élevage) ont été simulés : aucune exportation (pratiques actuelles), une paille sur trois (33 %), une paille sur deux (50 %) et deux pailles sur trois (67 %). Les projections sur 50 ans tiennent compte du changement climatique (augmentation de la température).

Dans le cas d'une exportation des pailles « à l'aveugle » (sans différencier les parcelles), la masse de pailles collectable dans le département

▶ Par rapport à la situation actuelle où toutes les pailles hors élevage sont restituées, exporter 1 paille sur 3 conduirait à une perte moyenne d'environ 0,5 tonne de carbone organique par hectare en 2050.

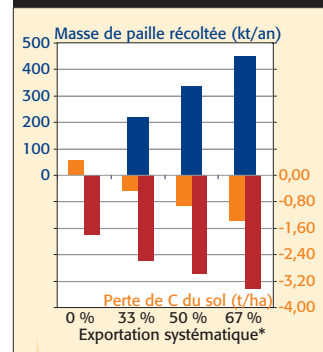
© N. Comte

serait de 220 000 tonnes par an pour le taux d'exportation le plus modéré (33 %). Par rapport à la situation actuelle (0 % d'exportation), le stock de carbone moyen décroîtrait de 0,46 t/ha au bout de 50 ans (bâtons orange). Mais le stock de carbone diminuerait de façon inacceptable dans les parcelles les plus sensibles (bâtons rouges).

Une meilleure stratégie, dite « raisonnée », consiste à ne

▶ **Les sols sableux sont moins sensibles aux pertes de matière organique suite à l'exportation des pailles.**

Quantités de paille récoltable (milliers de tonnes par an) et pertes de carbone du sol (tonnes/ha) simulées sur 50 an (fig. 3)



Les barres orange représentent la moyenne de toutes les parcelles. Les barres rouges représentent la moyenne des parcelles les plus sensibles aux pertes de carbone (premier quartile).
* Taux d'exportation systématique des pailles de céréales (en % des pailles actuellement restituées).

L'exportation d'une paille sur deux permettrait de collecter 330 000 tonnes/an de paille dans l'Aisne. Mais l'accroissement du taux d'exportation des pailles, de 0 à 67 % des quantités actuellement restituées, augmente les pertes de carbone du sol. Des exportations systématiques, sans cibler les parcelles les plus sensibles (représentées par le bâton rouge).

réaliser les prélèvements de pailles que dans les parcelles les moins sensibles. Ceci permettrait de produire presque autant de paille sans affecter les parcelles à risque. Une telle stratégie nécessite un outil d'aide à la décision pour l'agriculteur (*voir encadré 2*). Elle pourrait être accompagnée, au moins sur un échantillon de parcelles représentatives, d'un suivi analytique permettant de vérifier la durabilité de cette pratique.

Exporter la paille conduirait donc à légèrement diminuer les stocks de carbone par rapport à la situation actuelle. Pour inverser cette tendance, des mesures compensatoires peuvent être mises en œuvre : réduction du travail du sol ou généralisation des cultures intermédiaires. Ces deux mesures ont un effet très bénéfique sur le stockage de carbone dans le sol. ■

1 Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche de l'Aisne.

Pour en savoir plus

- Wylleman et al. (2001), *Perspectives Agricoles*, n° 270.
- Andriulo et al. (1999) *Agronomie*, 19 : 365-377.
- Saffih et Mary (2008) *Soil Biology & Biochemistry*, 40 : 594-607.

La robustesse du modèle de simulation des pertes de carbone ouvre la porte à un outil d'aide à la décision d'exporter ou non les pailles selon le contexte pédoclimatique de la parcelle. ▶

