

# Potentialités de stockage de C dans les sols par apports de matières organiques exogènes

Clément Peltre<sup>1</sup> (cpeltre@grignon.inra.fr), Sabine Houot<sup>1</sup> (sabine.houot@grignon.inra.fr).

<sup>1</sup> INRA, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval-Grignon.

## Introduction

Dans certaines régions de France et d'Europe, les teneurs en matière organique des sols (MOS) ont tendance à diminuer, entraînant une diminution de la fertilité des sols, de leur activité biologique et une augmentation de leur sensibilité à l'érosion. C'est pourquoi la commission européenne a récemment identifié la diminution des teneurs en MOS comme un des risques majeurs qui pèsent sur les sols. Par ailleurs, le sol représente le plus grand réservoir de C de la biosphère continentale contenant environ deux fois le stock de C atmosphérique et trois fois le stock de C contenu dans la végétation. Une augmentation des stocks de C organique des sols cultivés peut jouer un rôle significatif dans la limitation des émissions nettes de gaz à effet de serre vers l'atmosphère en stockant du C-CO<sub>2</sub> atmosphérique dans la MOS.

Les matières organiques exogènes (MOE) ont été définies comme l'ensemble des matières organiques apportées au sol dans le but de fertiliser, d'amender ou de restaurer les sols. Les MOE incluent les résidus organiques issus des activités agricoles, urbaines et industrielles ainsi que les produits issus de leur traitement (ensemble de MOE rassemblées sous l'appellation générique de produits résiduaux organiques, PRO) et comprend également les résidus de culture produits *in situ* du fait de la similarité des processus impliqués dans leur devenir, de leurs effets sur la fertilité des sols et des méthodes permettant de les caractériser (Marmo *et al.*, 2004). L'apport au sol de MOE est une des actions permettant de maintenir voire d'augmenter les stocks de C organique des sols (COS). Les MOE d'origine urbaine et industrielle représentent une source importante et en potentielle augmentation de matière organique (MO) pour les sols, notamment dans des zones péri-urbaines où les pratiques de polyculture-élevage ont disparu, systèmes de culture qui assurent classiquement la fourniture de MO pour les sols *via* les effluents d'élevage. L'efficacité des apports de MOE à augmenter les stocks de C des sols est très variable et dépend entre autres des caractéristiques de leur matière organique. Des modèles de dynamique du C dans les sols permettent de simuler les effets de différentes pratiques culturales sur la dynamique du COS sous différentes conditions pédoclimatiques. Il est nécessaire de déterminer les paramètres d'entrée des modèles concernant ces MOE en prenant en compte la grande diversité de leurs caractéristiques physico-chimiques. Basé sur le fractionnement biochimique de la MO, un indicateur (l'indice de stabilité de la matière organique, ISMO, Lashermes *et al.*, 2009) a été normalisé à l'AFNOR pour la caractérisation des amendements organiques. L'objectif du travail était de tester la possibilité d'utiliser l'indicateur ISMO pour prédire les évolutions de stock de COS après apports répétés de MOE (amendements organiques ou tout autre MOE).

## Description du modèle RothC

Un modèle simplifié à compartiments décrivant la dynamique du COS, RothC (Coleman & Jenkinson, 1999), a été retenu. Les apports de C y sont répartis dans des compartiments d'entrée de MO labile (DPM, temps moyen de résidence : TMR de 1.2 mois), résistante (RPM, TMR de 3.3 ans) et humifiée (HUM, TMR de 50 ans) par des coefficients de partition qui dépendent de la nature des apports ( $f_{DPM}$ ,  $f_{RPM}$ ,  $f_{HUM} = 1 - f_{DPM} - f_{RPM}$ ) (Figure 1). A chaque pas de temps mensuel, une partie de chaque compartiment est décomposée suivant la vitesse de décomposition propre du compartiment ( $k$ ). Une partie est minéralisée sous forme

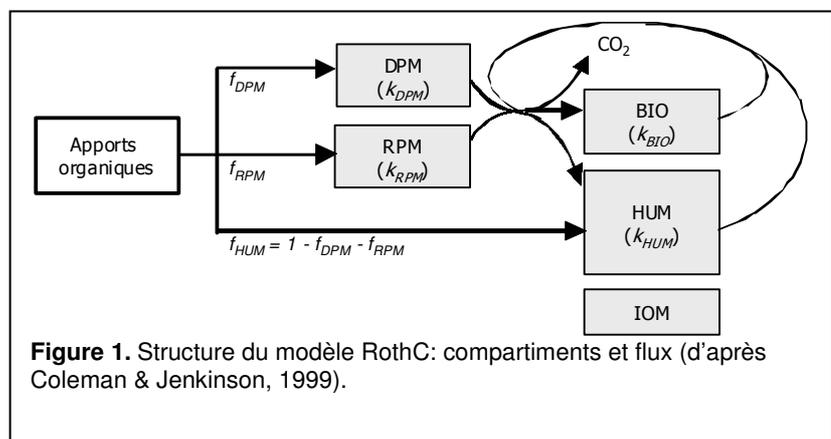


Figure 1. Structure du modèle RothC: compartiments et flux (d'après Coleman & Jenkinson, 1999).

de CO<sub>2</sub> et le reste est transféré dans les compartiments BIO (biomasse microbienne, TMR de 1,5 an) et HUM (humifié). La proportion qui est transformée en CO<sub>2</sub> et en BIO+HUM est dépendante de la teneur en argile du sol. La part transférée dans BIO+HUM est répartie en 46% de BIO et 54% de HUM. Les constantes de vitesses sont modifiées à chaque pas de temps par trois facteurs multiplicatifs, dépendant de la température, de l'humidité du sol, de la présence/absence de végétation. Une partie du COS est considérée comme « inerte » (IOM) ayant un TMR infini, dont l'influence est négligeable n'intervenant pas pendant la période simulée (Coleman & Jenkinson, 1999).

## Paramétrage du modèle

Les données de quatre essais au champ nationaux et internationaux de moyenne – longue durée (Ultuna, Suède, 51 ans ; Askov, Danemark, 31 ans ; SERAIL, Rhône-Alpes, 14 ans ; Qualiagro, Île-de-France, 11 ans) ont été utilisées afin d'ajuster les coefficients de partition du C des MOE dans les compartiments d'entrée du modèle. Les différents essais au champ couvrent des situations pédoclimatiques et des types de MOE apportées contrastés (Tableau 1).

**Tableau 1.** Principales caractéristiques des essais au champ.

	Essai d'Askov K2	Essai Qualiagro	Essais de la SERAIL	Essai d'Ultuna
Location	Askov, Danemark	Feucherolles, France (78)	Brindas, France (69)	Uppsala, Suède
Durée	30 ans	11 ans	14 ans	52 ans
Teneur en argile (%)	2.5	15.2	16.8	37.0
Teneur en C initiale (%)	0.3	1.0	1.2	1.5
Température moyenne annuelle (°C)	7.4 ± 0.7	11.0 ± 0.5	12.9 ± 0.5	5.7 ± 1.0
Précipitations moyennes annuelles (mm)	972 ± 160	643 ± 128	822 ± 118	541 ± 93
Rotation culturale	Orge de printemps, lin textile, céréales d'hiver, ensilage de maïs	Blé, Maïs	Rotation légumière	62% céréales de printemps, 15% Maïs ensilage, 33% colza et autre cultures
MOE apportées	- Pailles mures ; - Sciure ; - Fumier ; - Tourbe	- Compost d'ordures ménagères résiduelles ; - Fumier ; - Compost de déchets verts + boue ; - Compost de biodéchets	- Fumier déshydraté ; - Fumier frais ; - Compost de palettes enrichi ; - Compost de tourteaux de café enrichi ; - Compost de déchets verts	- Paille ; - Engrais vert ; - Sciure ; - Fumier ; - Boue d'épuration ; - Tourbe

Le modèle simule de façon satisfaisante les cinétiques d'accumulation de C dans le sol suite aux apports de MOE mesurées dans les différents essais au champ après ajustements des coefficients de partition sur ces résultats d'évolution des stocks de C dans les sols au fur et à mesure des apports (Tableau 2) avec des valeurs de RMSE (root mean square error ou écart standard moyen) et de son coefficient de variation CV(RMSE) basses (CV(RMSE) <25%) et des valeurs d'efficacité du modèle (EF) généralement proche de 1 pour les essais Askov K2, Qualiagro, et Ultuna. Les ajustements présentent une plus forte variabilité pour l'essai de la SERAIL en raison de la plus grande variabilité des teneurs en COS mesurées au champ. Les MOE ont des valeurs de coefficients de partition contrastées reflétant la diversité de composition de ces MOE, comme indiqué par les valeurs contrastées d'indicateur ISMO.

Le modèle permet ensuite de calculer des rendements de stockage de C à partir de scénarios d'apports des MOE : pour des apports de 2 tonnes de C tous les deux ans d'une MOE donnée pendant 20 ans, la vitesse de stockage du C varie de 0.14 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour un engrais vert (herbe épandue) à 0.60 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour un compost de déchets verts très stabilisé (Tableau 2), ce qui représente des accumulations de C relativement importantes comparé à d'autres pratique permettant de stocker du C dans les sols. Ainsi par exemple, le labour réduit permettrait d'accumuler du C à un taux de 0.20 – 0.34 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (Smith *et al.*, 1998; Arrouays *et al.*, 2002) et la restitution d'engrais verts cultivés en inter-culture permettrait d'accumuler du C à un taux de 0.16 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (Arrouays *et al.*, 2002).

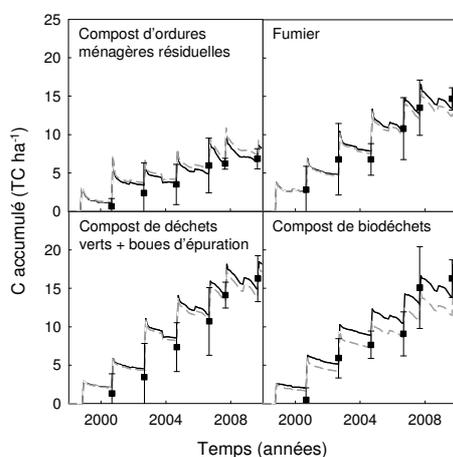
**Tableau 2.** Ajustement des coefficients de partition des MOE dans les compartiments d'entrée du modèle RothC labile, résistant et humifié ( $f_{DPM}$ ,  $f_{RPM}$  et  $f_{HUM} = 100\% - f_{DPM} - f_{RPM}$ ) en % du C organique total des MOE : %COT). Indicateurs statistiques de la qualité des ajustements : Root mean square error : RMSE, coefficient de variation de la RMSE (CV(RMSE)), efficacité du modèle (EF). Rendement d'accumulation du C pour un scénario d'apport de MOE à une dose de 2 tC ha<sup>-1</sup> tous les deux ans sur 20 ans en climat tempéré (% du C apporté par les MOEs accumulé dans le sol : Y<sub>20</sub>), taux annuel d'accumulation du C dans le sol (R<sub>20</sub>) et indicateur de stabilité de la MO (ISMO). Résultats pour les essais Askov K2 (Ask), Qualiagro (Qua), SERAIL (Ser) et Ultuna (Ult).

Traitement	$f_{DPM}$	$f_{RPM}$	$f_{HUM}$	RMSE	CV(RMSE)	EF	Y <sub>20</sub>	R <sub>20</sub>	ISMO
	-----%COT-----			tC ha <sup>-1</sup>	%		% du C apporté	tC ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup>	% MO
PAI-Ask	58.5	38.4	3.1	1.6	13.4	0.89	21.8	0.22	35.2
SCI-Ask	56.9	31.5	11.6	2.8	17.5	0.77	27.0	0.27	48.3 ± 3.7
FUM-Ask	37.7	42.3	20.0	1.3	8.6	0.96	35.7	0.36	61.4 ± 11.2
TOU-Ask	18.8	38.9	42.4	4.0	12.9	0.93	52.4	0.52	65.2 ± 2.9
OMR-Qua	62.3	37.7	0.0	0.7	13.9	0.92	19.2	0.19	45.0 ± 12.8
FUM-Qua	30.1	49.9	20.0	1.2	13.3	0.93	37.2	0.37	68.9 ± 6.0
DVB-Qua	15.3	64.7	20.0	1.3	13.3	0.95	40.2	0.40	78.9 ± 10.5
BIOD-Qua	0.0	80.0	20.0	1.6	17.0	0.92	43.2	0.43	78.3 ± 5.8
FMT-Ser	71.2	28.8	0.0	2.0	36.2	0.55	17.5	0.18	49.3
FUM-Ser	70.1	29.9	0.0	3.4	65.8	0.38	17.7	0.18	49.3
VGH-Ser	39.2	60.8	0.0	3.9	61.5	-0.16	23.9	0.24	69.4 ± 4.5
ALG-Ser	8.9	82.4	8.7	3.8	41.2	0.39	34.9	0.35	82.7 ± 6.3
DV-Ser	2.0	49.2	48.8	4.1	35.2	0.68	59.4	0.60	92.2 ± 2.5
PAI-Ult	88.2	11.8	0.0	2.3	24.2	0.14	14.1	0.14	27.4 ± 2.0
EV-Ult	90.3	9.7	0.0	2.5	22.8	0.07	13.6	0.14	11.0 ± 4.8
SCI-Ult	53.2	44.5	2.3	1.7	12.3	0.84	22.4	0.23	48.3 ± 3.7
FUM-Ult	49.2	40.6	10.2	3.3	17.2	0.59	27.8	0.28	50.3 ± 7.2
BOUE-Ult	0.0	85.3	14.7	6.7	22.4	0.11	40.2	0.40	61.2 ± 15.6
TOU-Ult	0.0	57.8	42.2	5.8	16.7	0.72	56.1	0.56	65.2 ± 2.9

PAI : paille, SCI : sciure, FUM : fumier, TOU : tourbe, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, DVB : compost de déchets verts plus boue d'épuration, BIOD : compost de biodéchets, FMT : fumier déshydraté, VGH : compost de tourteaux de café enrichi (Végéthumus), ALG : compost d'écorces enrichi (Algoforestier), DV : compost de déchets verts, EV : engrais vert (herbe), BOUE : boue dépuratoire.

## Relation entre les paramètres du modèle et la composition des MOE apportées

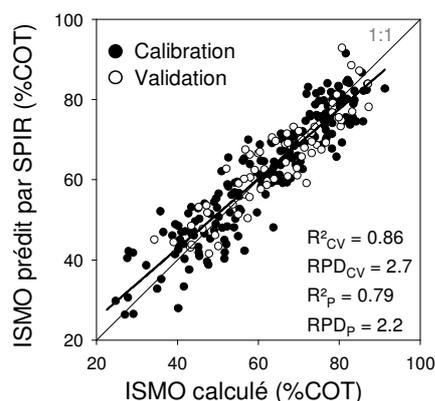
Sur la base de l'ensemble des résultats des quatre essais au champ des relations statistiques ont été élaborées pour prédire les coefficients de partition des MOE dans les compartiments labile et résistant du modèle ( $f_{DPM}$  et  $f_{RPM}$ ) à partir de l'indicateur ISMO (Tableau 2) tel que défini et calculé à partir de données de fractionnement biochimique des MOE par la méthode Van Soest (AFNOR XPU 44-162) et de proportion du C des MOE potentiellement minéralisé après trois jours d'incubation en conditions contrôlées (AFNOR XPU 44-163). L'utilisation des coefficients de partition ainsi prédits permet de simuler les cinétiques d'accumulation du C des MOE dans les différents essais au champ de manière satisfaisante (Figure 2).



**Figure 2.** Simulation du stockage de C dans le sol, exemple de l'essai Qualiagro avec les coefficients de partition de la MO des composts et fumier dans les compartiments d'entrée de RothC ajustés sur les données d'évolution des stocks de C mesurées (traits noirs) ou (2) prédits à partir de l'indicateur ISMO (traits pointillés gris).

## Prédiction de l'indicateur ISMO par spectroscopie proche infrarouge (SPIR)

L'indicateur ISMO est basé sur des analyses chimiques relativement coûteuses et nécessitant au minimum, une semaine de temps. La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) permet de s'affranchir de l'analyse chimique et de déterminer des caractéristiques des MOEs à partir d'une mesure rapide, non destructive et peu coûteuse de l'échantillon. La prédiction par SPIR requiert au préalable la mise au point de modèles de prédiction entre les caractéristiques des MOEs mesurées au laboratoire et leur spectres dans le proche infrarouge. Les modèles de prédiction sont généralement considérés comme satisfaisants pour des indicateurs RPD >2 et  $R^2 > 0.8$ . La Figure 3 présente les valeurs d'ISMO de MOE de natures diverses (composts, fumiers, lisiers, résidus végétaux etc.) calculées à partir de données de fractionnement biochimiques et prédites par SPIR (Peltre *et al.*, 2011). L'indicateur ISMO peut être prédit de manière satisfaisante à partir des propriétés spectrales des MOE dans le proche infrarouge ( $R^2 \geq 0.8$ , RPD >2).



**Figure 3.** Indicateur de stabilité de la MO (ISMO, Lashermes et al. 2009) exprimé en % du C organique total des MOE (%COT) calculé tel que prévu dans la norme XPU 44-162 et prédit à partir de mesures spectrales des MOE par SPIR. Coefficient de détermination  $R^2$  et ratio of performance to deviation (RPD) calculés par validation croisée sur le jeu de données de calibration (196 échantillons) et sur un jeu de données de validation indépendant (70 échantillons) (CV et P, respectivement).

## Conclusions et perspectives

La méthodologie mise au point peut être utilisée pour simuler des cinétiques d'accumulation du C dans le sol suite à des apports de MOE dans diverses situations. La SPIR peut être utilisée comme méthode plus rapide et moins coûteuse que les analyses chimiques pour déterminer les valeurs d'ISMO. Les estimations de stockage de C pourront ensuite être intégrées dans des analyses de cycle de vie des filières de traitements des déchets avec valorisation agricole des MOE après traitement, afin de mieux caractériser le bilan environnemental de ces filières.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Véolia Environnement Recherche & Innovation pour leur soutien technique et financier, B.T. Christensen, T. Kätterer, C. Icard et S. Dragon pour la fourniture des données relatives aux essais au champ d'Askov, d'Ultuna et de la Serail, B. Barthès, D. Brunet et L. Thuriès pour leur contribution dans les analyses par SPIR. Une publication portant sur le paramétrage du modèle RothC sur les données des différents essais au champ a été soumise à la revue *Agriculture, Ecosystems & Environment*, avec l'ensemble des participants à ce travail comme co-auteurs.

## Références bibliographiques

- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P. (Eds.), 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1999. A model for the turnover of carbon in soil, Model description and windows users guide. IACR – Rothamsted Harpenden Herts AL5 2JQ, p. 47.  
[http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/mod26\\_3\\_win.pdf](http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/mod26_3_win.pdf)
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science* 60, 297-310.
- Marmo, L., Feix, I., Bourmeau, E., Amlinger, F., Bannick, C.G., De Neve, S., Favoino, E., Gendebien, A., Gibert, J., Givelet, M., Leifert, I., Morris, R., Rodriguez Cruz, A., Ruck, F., Siebert, S., Tittarelli, F., 2004. Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection. Volume - III. Organic matter and biodiversity. Taskgroup 4 on exogenous organic matter. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.  
<http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/vol3.pdf>.
- Peltre, C., Thuriès, L., Barthès, B., Brunet, D., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Houot, S., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy: a tool to characterize the composition of different types of exogenous organic matter and their behaviour in soil. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 197-205.
- Smith, P., Powlson, D.S., Glendining, M.J., Smith, J.U., 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology* 4, 679-685.