

Dynamique des matières organiques des sols, modèles proposés et relations modèles-organismes

A. Valery^(1,*) et M. Pansu⁽²⁾

- 1) Groupe de Recherche en Biotechnologie Agricole et Environnementale (GIBAA). Université Nationale Expérimentale de Táchira UNET. San Cristóbal, Táchira, Venezuela.
- 2) UMR Eco&Sols, IRD, INRAe, CIRAD, Univ Montpellier, Supagro, Bât. 12, 2 Place Viala, 3406, Montpellier Cedex 2, France.

* Auteur correspondant : avalery@unet.edu.ve

RÉSUMÉ

Les modèles de simulations représentent un outil prometteur pour évaluer la dynamique des matières organiques des sols (MOS) à l'aide d'une approche écosystémique. Ils ont le vent en poupe du fait de l'importance des MOS dans les différents cycles biogéochimiques, en lien avec la séquestration du carbone (C), la fertilité des sols et les besoins en eau. Comment prendre en compte la grande diversité des substrats et organismes qui interagissent dans le sol, tout en respectant au mieux le principe de parcimonie nécessaire à la modélisation ? Le présent travail montre que la plupart des modèles référencés depuis 2010 sont constitués de 4 ou 5 compartiments, 65 % d'entre eux proposent l'utilisation d'équations du premier ordre pour décrire les flux de matières entre ces compartiments. Si plus des trois quarts intègrent explicitement la biomasse microbienne exprimée en unités de C (CBM), seulement 18 % confrontent leurs prédictions à des résultats de mesures dont 13 % à des résultats CBM. Si l'analyse place les modèles RothC, Century et Momos comme les plus cités, elle met aussi en évidence la complexité des processus de transformation. A l'exception de versions récentes étendues à des écosystèmes (T&C-BG) et agrosystèmes (Momos), il existe peu de modèles qui font référence au fonctionnement de

Comment citer cet article :

Valery A. et Pansu M., 2022 - Dynamique des matières organiques des sols, modèles proposés et relations modèles-organismes - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 169-184

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-29/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

plusieurs groupes fonctionnels microbiens et à la relation de ceux-ci avec la mésofaune, la macrofaune, le climat et la croissance des plantes. Ceci est probablement dû à la perte de parcimonie de la paramétrisation des systèmes d'équations par rapport à la diversité du vivant et aux résultats disponibles pour les ajustements. Notre étude montre ainsi la nécessité de continuer à tester les différentes propositions en relation avec la collecte de nouvelles données sur les écosystèmes terrestres.

Mots-clés

Modélisation, microorganisme, cycles C et N, parcimonie, MOMOS

SUMMARY

DYNAMICS OF SOIL ORGANIC MATTER, PROPOSED MODELS AND MODEL-ORGANISM RELATIONSHIPS

Simulation models are a promising tool to assess soil organic matter (SOM) dynamics using an ecosystem approach. They are on the rise due to the importance of SOM in the various biogeochemical cycles, in connection with carbon (C) sequestration, soil fertility and water needs. How to take into account the great diversity of substrates and organisms that interact in the soil, while best respecting the principle of parsimony necessary for modelling. This work shows that most of the models referenced since 2010 consist of 4 or 5 compartments, 65% of them propose the use of first order equations to describe the flow of materials between these compartments. If more than three quarters explicitly integrate the microbial biomass expressed in units of C (CBM), only 18% compare their predictions with measurement results, of which 13% with CBM results. If the analysis places the RothC, Century and Momos models as the most cited, it also highlights the complexity of the transformation processes. With the exception of recent versions extended to ecosystems (T&C-BG) and agrosystems (Momos), there are few models that refer to the functioning of several microbial functional groups and their relationship with the mesofauna, the macrofauna, climate and plant growth. This is probably due to the loss of parsimony of the parametrization of the systems of equations in relation to the diversity of living organisms and to the results available for the adjustments. Our study thus shows the need to continue testing the various proposals in relation to the collection of new data on terrestrial ecosystems.

Key-words

Modeling, microorganism, C and N cycles, parsimony, MOMOS

RESUMEN

DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO, MODELOS PROPUESTOS Y RELACIONES MODELO-ORGANISMO

Los modelos de simulación son una herramienta prometedora para evaluar la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) utilizando un enfoque ecosistémico. Están en aumento debido a la importancia de la MOS en los diversos ciclos biogeoquímicos, en relación con el secuestro de carbono (C), la fertilidad del suelo y las necesidades de agua. Cómo tener en cuenta la gran diversidad de sustratos y organismos que interactúan en el suelo, respetando al máximo el principio de parsimonia necesario para la modelización. Este trabajo muestra que la mayoría de los modelos referenciados desde 2010 consisten en 4 o 5 compartimentos, el 65 % de ellos propone el uso de ecuaciones de primer orden para describir el flujo de materiales entre estos compartimentos. Si más de las tres cuartas partes integran explícitamente la biomasa microbiana expresada en unidades de C (CBM), solo el 18 % compara sus predicciones con los resultados de medición, de los cuales el 13 % con los resultados de CBM. Si el análisis sitúa a los modelos RothC, Century y Momos como los más citados, también destaca la complejidad de los procesos de transformación. A excepción de versiones recientes extendidas a ecosistemas (T&C-BG) y agrosistemas (Momos), existen pocos modelos que se refieran al funcionamiento de varios grupos funcionales microbianos y su relación con la mesofauna, la macrofauna, el clima y el crecimiento vegetal. Esto probablemente se deba a la pérdida de parsimonia de la parametrización de los sistemas de ecuaciones en relación a la diversidad de organismos vivos ya los resultados disponibles para los ajustes. Nuestro estudio muestra, por tanto, la necesidad de seguir probando las distintas propuestas en relación con la recogida de nuevos datos sobre los ecosistemas terrestres.

Palabras clave

Modelización, microorganismo, ciclos de C y N, parsimonia, MOMOS

Au niveau mondial, le sol est un réservoir de carbone (C) supérieur à celui que l'on trouve dans la végétation et l'atmosphère. Il contient plus de 69 % du C de la biosphère émergée (Buysse et Aubinet, 2010; Liang *et al.*, 2009). Le cycle du C est complexe, car il implique divers processus biologiques, géologiques, chimiques et physiques (Martínez *et al.*, 2008). Le C du sol se présente sous des formes inorganiques (carbonates) et de nombreuses formes de matières organiques (MOS) fondamentales dans de multiples processus écologiques (Qi *et al.*, 2002). La MOS est aussi liée à d'autres cycles biogéochimiques, que celui du C, elle contient d'autres éléments indispensables à la vie tels que l'azote (N) et le phosphore (P), des cations échangeables et des microéléments comme les oligo-éléments des plantes (Cayuela *et al.*, 2009).

Il existe un grand nombre de modèles de simulation des processus qui déterminent le stockage ou la perte de C du sol, son effet sur les changements climatiques, le fonctionnement des écosystèmes, l'orientation de diverses pratiques agricoles (Herbst *et al.*, 2018). Les modèles théoriques, schématiques ou mathématiques cherchent à expliquer le stockage et la transformation de la MOS. Ceux qui décrivent les changements dans les formes de C organique ont des caractéristiques souvent similaires, comme être constitués de compartiments, qui représentent les différents composés organiques (formes labiles et stables des substrats d'entrée et matières transformées, microorganismes actifs).

Ils ont évolué avec différents degrés de complexité depuis les dernières décennies. Les modèles comparés par Manzoni et Porporato (2009) présentaient des différences tant dans le nombre de compartiments organiques que dans l'incorporation explicite ou implicite du ou des compartiment(s) microbien(s). Comment prendre en compte au mieux la grande polyvalence des microorganismes du sol qui leur permet d'effectuer un si grand nombre de transformations des MOS? Les microorganismes contrôlent les flux de C et le cycle des nutriments, dans des processus variés tels que la décomposition, l'ammonification, la nitrification l'immobilisation, la dénitrification (Dilly, 2001).

L'importance de la MOS et les nombreuses tentatives de modélisation de sa dynamique nécessitaient la présente revue des modèles qui simulent les évolutions des MOS.

MÉTHODES

Des informations ont été recueillies à partir de la littérature en utilisant pour termes de recherche les expressions « modèles de simulation de carbone » ou « modèles de simulation de MOS ». Une revue systématique a été réalisée en intégrant dans le moteur de recherche un filtre de sélection des articles dont la date de publication se situe entre 2010 et mi-2021 pour faire suite à la revue publiée par Manzoni et Porporato en 2009.

Au total, 440 articles ont été examinés, dont seulement 37,5 % (168 articles) ont été retenus, la sélection s'est faite sur la présence d'un modèle clairement énoncé ou, à défaut, référencé pour qu'il puisse être analysé au sujet des flux de matières échangées et des équations qui sont utilisées dans ces échanges. Il a été pris en considération qu'il ne s'agissait pas seulement d'une discussion sur les capacités prédictives des modèles, mais aussi sur la logique de leur structuration et de leur paramétrisation.

Chaque article scientifique a été caractérisé par l'année de publication, le nom du modèle de simulation utilisé, son nombre de compartiments, la présence explicite ou non du compartiment biomasse microbienne en termes de carbone (CBM) et d'azote (NBM). Ont été prises en compte également les lois physico-chimiques et biologiques utilisées telles que Arrhenius, Michaelis-Menten, Arrhenius/Michaelis-Menten, Monod, relation enzyme/substrat, équilibres chimiques, cinétiques du premier ordre, du second ordre, linéaire, logistique, multiplicative, régression. Un autre critère a été la présence ou non de résultats de mesures calibrant les prédictions (biomasse microbienne, respiration, carbone organique du sol et carbone organique dissous), ainsi que les variables régulant les flux, le lieu où la recherche a été appliquée (par continent).

Les données collectées, tant qualitatives que quantitatives, ont été systématiquement tabulées, identifiant les caractéristiques générales des modèles qui décrivent la dynamique des MOS et leur application, ce qui a permis de les comparer par exemple sur l'incorporation explicite ou non de la biomasse microbienne.

RÉSULTAT

Les modèles publiés

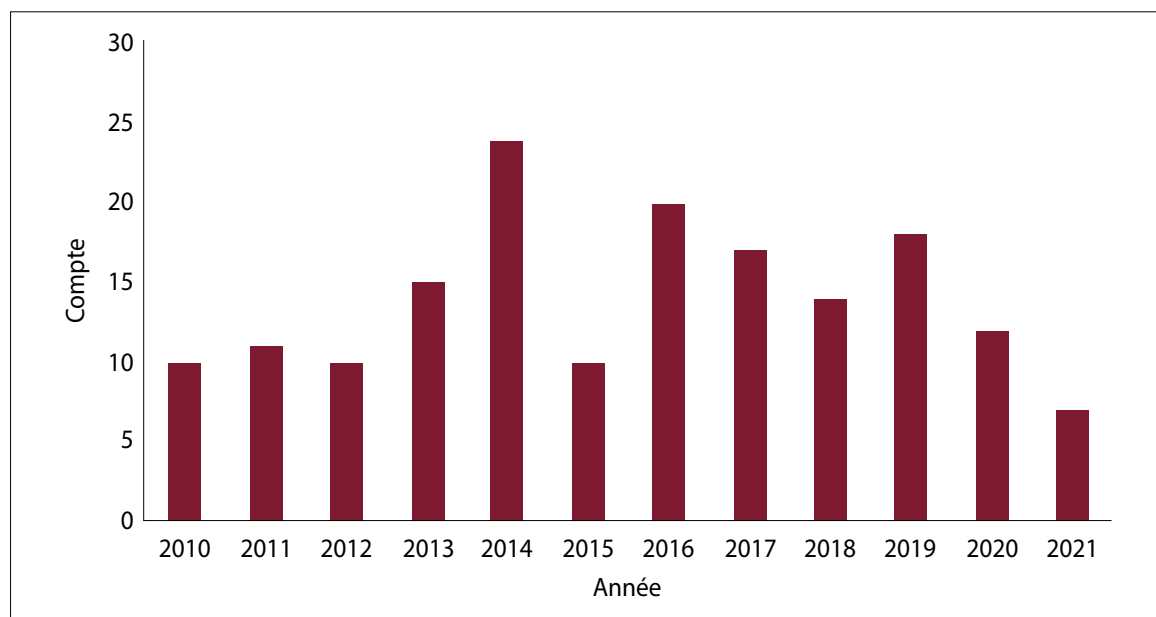
Le nombre de publications annuelles de modèles de simulation MOS semble assez stable, il se situe entre 10 et 25 publications (*Figure 1*).

La plupart des modèles publiés proviennent des continents européen et nord-américain, qu'ils intègrent ou non la biomasse microbienne (*Tableau 1*).

Dans les 168 articles sélectionnés, un total de 76 modèles différents a été trouvé (*Tableau 2*), les plus référencés étant RothC dans 15,8 % des cas, Century dans 8,4 % et MOMOS dans 5,1 %. Le nombre de compartiments des modèles varie entre 1 et 13 avec une tendance entre 4 ou 5 compartiments.

Grands types de modèles

Les données publiées montrent que 76,5 % du total des modèles présentent explicitement un compartiment CBM, tan-

Figure 1 - Nombre de publications par an sur la modélisation des cycles C et N.**Figure 1** - Number of publications per year on modelling of C and N cycles.**Tableau 1** - Pourcentage (%) de modèles présentant explicitement ou non le compartiment BM selon le lieu d'implantation.**Table 1** - Percentage (%) between the explicit presence or not of the BM compartment and the location.

Lieu d'implantation	Biomasse microbienne explicite (CBM)	
	Non	Oui
Afrique		2,6
Asie	1,3	6,2
Océanie		3,9
Amérique centrale	0,7	2,9
Europe	12,4	21,8
Global	1,6	9,7
Amérique Nord	5,5	23,5
Amérique Sud	2	5,9

dis que les autres modèles ne distinguent pas la biomasse microbienne des autres composés organiques. Seulement 13 % des publications montrent un compartiment NBM; de la même manière, malgré le pourcentage élevé de modèles qui présentent un compartiment CBM, seulement 18 % des publications présentent des simulations de cette CBM (Tableau 3); 2,6 % présentent des résultats de CBM subdivisés en bactéries et champignons; 1,6 % présentent la macrofaune, dans ce cas

des vers de terre (p.e. Komarov *et al.*, 2017). D'autre part, il y a 77,8 % de modèles qui présentent des résultats liés au carbone du sol (COS), au carbone dissout (DOC) ou à la respiration du sol (CO₂), qui pourraient être associés à la BM. Tous les modèles présentant un compartiment BM de manière explicite ne font pas de cette variable une réponse du modèle.

Cette étude montre les différences entre les modèles en termes de présentation explicite ou non de la biomasse microbienne ainsi que d'autres variables prises en compte dans les prédictions (Tableau 3).

Les comparaisons concernant le nombre de compartiments et l'intégration explicite de BM (Tableau 4) montrent que les modèles composés de 4 et 5 compartiments ont tendance à incorporer explicitement la BM. D'autres modèles avec des nombres de compartiments différents l'incorporent aussi parfois, à l'exception des modèles à moins de 4 compartiments qui incorporent très rarement BM mais l'incluent implicitement sans le préciser dans les matières labiles.

Les équations du premier ordre (Tableau 5) sont utilisées dans la plupart des modèles qui présentent explicitement la BM (45,3 %) ou non (20,5 %), de même, la cinétique basée sur l'équation de Michaelis-Menten apparaît dans 22,1 % des modèles qui présentent explicitement BM. D'autres équations sont présentées avec un pourcentage d'utilisation inférieur par des modèles qui simulent la MOS tels que l'équation d'Arrhenius, Arrhenius/Michaelis-Menten, l'approximation des équilibres chimiques, les réactions enzyme-substrat, linéaire, logistique, Monod, multiplicative et régressive.

Tableau 2 - Modèles publiés depuis 2010. « Compart. » indique le nombre de compartiments ; CBM est le carbone de la biomasse microbienne ; NBM est l'azote de la biomasse microbienne ; présence explicite de CBM et NBM + oui, - non, ± dans certains articles l'information est présentée et dans d'autres elle ne l'est pas.

Table 2 - Models published since 2010. Compart indicates the number of compartments; CBM is microbial biomass carbon; NBM is microbial biomass nitrogen; explicit presence of CBM and NBM + yes, - no, ± in some articles the information is presented and in others it is not.

Modèles	Compart.	CBM	NBM	Référence
AggModel	8	-	-	Segoli <i>et al.</i> (2013)
AMG	2	-	-	Albers <i>et al.</i> (2020) ; Clivot <i>et al.</i> (2019)
APSIM	4	+	±	Li <i>et al.</i> (2014a, 2016a) ; Luo <i>et al.</i> (2014, 2016) ; O'Leary <i>et al.</i> (2016)
AWB	4	+	-	Hagerty <i>et al.</i> (2018) ; Li <i>et al.</i> (2014b)
Arrhenius Model	4	+	-	Abramoff <i>et al.</i> (2017b)
BAMS1	8	+	-	Dwivedi <i>et al.</i> (2017) ; Riley <i>et al.</i> (2014)
BAMS2	5	+	-	Cerriotti <i>et al.</i> (2020)
Basic soil model	3	+	+	Neill (2011)
CarboSOIL	1	-	-	Muñoz-Rojas <i>et al.</i> (2013)
CASA-CNP	3	-	-	Wieder <i>et al.</i> (2018)
CASS	5	-	-	Almulqu et Boonyanuphap (2017)
CCB	3	-	-	Franko et Spiegel (2016) ; Franko et Merbach (2017) ; Riggers <i>et al.</i> (2019)
CDMZ	4	+	-	Abs <i>et al.</i> (2019, 2020)
CDMZX	5	+	-	Abs <i>et al.</i> (2020)
Century	5	-	-	Abramoff <i>et al.</i> (2017b) ; Basso <i>et al.</i> (2011) ; Bortolon <i>et al.</i> (2011) ; Brandani <i>et al.</i> (2015) ; Caddeo <i>et al.</i> (2019) ; Cong <i>et al.</i> (2014) ; Dimassi <i>et al.</i> (2018) ; Fujita <i>et al.</i> (2014) ; Huang <i>et al.</i> (2018) ; Leite <i>et al.</i> (2011) ; Li <i>et al.</i> (2011b) ; Lima <i>et al.</i> (2011) ; Oelbermann et Voroney (2011) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012) ; Riggers <i>et al.</i> (2019) ; Shi <i>et al.</i> (2018) ; Zhang <i>et al.</i> (2018, 2021)
CERES-EGC	7	+	+	Lehuger <i>et al.</i> (2010) ; Noiro-Cosson <i>et al.</i> (2016)
C-Farm	2	-	-	Kemanian et Stöckle (2010)
CLM-Microbe	3	+	-	Hararuk <i>et al.</i> (2015) ; He <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Shi <i>et al.</i> (2018) ; Wieder <i>et al.</i> (2013)
COMMISSION	4	+	-	Ahrens <i>et al.</i> (2015)
Conceptuel	4	+	-	Glanville <i>et al.</i> (2016) ; He <i>et al.</i> (2015)
CON	4	+	-	Li <i>et al.</i> (2014b)
CORPSE	4	+	-	Sulman <i>et al.</i> (2014, 2018) ; Wieder <i>et al.</i> (2018)
CoupModel	2	-	-	Palosuo <i>et al.</i> (2012)
CQESTR	3	-	-	Del Grosso <i>et al.</i> (2016) ; Gollany <i>et al.</i> (2010, 2013) ; Gollany (2016) ; Gollany et Elnaggar (2017) ; Leite <i>et al.</i> (2011) ; Nash <i>et al.</i> (2018a; 2018b, 2018c) ; Plaza <i>et al.</i> (2012) ; Wienhold <i>et al.</i> (2016)
C-STABILITY	2	+	-	Sainte-Marie <i>et al.</i> (2021)

Modèles	Compart.	CBM	NBM	Référence
C-TOOL	3	-	-	Riggers <i>et al.</i> (2019) ; Taghizadeh-Toosi <i>et al.</i> (2014)
Daisy	6	+	-	Laub <i>et al.</i> (2019, 2021)
DAMM	4	+	+	Abramoff <i>et al.</i> (2017b) ; Sihi <i>et al.</i> (2018)
Daycent	5	-	-	Bista <i>et al.</i> (2016) ; Del Grosso <i>et al.</i> (2016) ; Gurung <i>et al.</i> (2020) ; Kyker-Snowman <i>et al.</i> (2020) ; Sulman <i>et al.</i> (2018) ; Wieder <i>et al.</i> (2013, 2014, 2015)
DECONIT	6	+	+	de Bruijn et Butterbach-Bahl (2010)
DEMENT	3	+	-	Allison (2012, 2014)
DENZY	5	-	-	Chen <i>et al.</i> (2019)
DNDC	4	+	-	Khalil <i>et al.</i> (2020) ; Li <i>et al.</i> (2016b, 2017) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012) ; Singh et Benbi (2020) ; Wang <i>et al.</i> (2014) ; Zhang <i>et al.</i> (2014 ; 2017)
DSCSP	3	-	-	Ordoñez <i>et al.</i> (2020)
EcoSMMARTS	8	+	-	Brangarí <i>et al.</i> (2020)
ecosystem T&C-BG	13	+	-	Fatichi <i>et al.</i> (2019)
EEZY	9	+	+	Moorhead <i>et al.</i> (2012)
EPIC	5	+	-	Zhao <i>et al.</i> (2013)
FöBAAR	4	-	-	Carbone <i>et al.</i> (2016) ; Sihi <i>et al.</i> (2018)
FOND	6	+	-	Fan <i>et al.</i> (2021)
FWD	3	+	-	Sihi <i>et al.</i> (2016, 2018)
GER microbial	3	+	-	Li <i>et al.</i> (2014b)
Hénin-Dupuis	3	+	-	Cardinael <i>et al.</i> (2015) ; Bosco <i>et al.</i> (2013)
ICBM	2	-	-	Ahrens <i>et al.</i> (2014) ; Bolinder <i>et al.</i> (2012) ; Menichetti <i>et al.</i> (2016) ; Riggers <i>et al.</i> (2019)
LIDEL	7	+	-	Campbell <i>et al.</i> (2016)
MEMS	9	±	-	Robertson <i>et al.</i> (2019) ; Zhang <i>et al.</i> (2020)
MEND	11	+	-	Jian <i>et al.</i> (2020) ; Li <i>et al.</i> (2014b) ; Sulman <i>et al.</i> (2018) ; Wang <i>et al.</i> (2013, 2015, 2017)
microbe-enzyme	4	+	-	Allison <i>et al.</i> (2010) ; Georgiou <i>et al.</i> (2017) ; German <i>et al.</i> (2012) ; He <i>et al.</i> (2014)
microbial	2	+	-	Georgiou <i>et al.</i> (2017)
Millennial	5	+	-	Abramoff <i>et al.</i> (2017a)
MIMICS	6	+	±	Kyker-Snowman <i>et al.</i> (2020) ; Shi <i>et al.</i> (2018) ; Sulman <i>et al.</i> (2018) ; Wieder <i>et al.</i> (2014, 2015, 2018) ; Zhang <i>et al.</i> (2021)
MIND	4	+	-	Fan <i>et al.</i> (2021)
Minimaliste	2	-	-	Menichetti <i>et al.</i> (2016)

Modèles	Compart.	CBM	NBM	Référence
MOMOS	5	+	±	Ibrahim <i>et al.</i> (2013, 2016, 2021) ; Latati <i>et al.</i> (2019) ; Pansu <i>et al.</i> (2010, 2014, 2018) ; Hammoudi <i>et al.</i> (2015, 2017, 2018) ; Kherif <i>et al.</i> (2021)
MOSES	9	+	-	Aitkenhead <i>et al.</i> (2011)
NCSOIL	8	+	+	Noirot-Cosson <i>et al.</i> (2013, 2016, 2017)
OMDY	5	+	-	Incerti <i>et al.</i> (2017)
OPT	3	+	-	Sihi <i>et al.</i> (2016)
ORCHIDEE	9	-	-	Camino-Serrano <i>et al.</i> (2018, 2019)
ORCHIMIC	11	+	+	Huang <i>et al.</i> (2018, 2021)
PASTIS-CANTIS	5	+	-	Chalhoub <i>et al.</i> (2013)
PRIM	5	-	-	Huang <i>et al.</i> (2018)
Q model	2	-	-	Hyvönen <i>et al.</i> (2012) ; Ortiz <i>et al.</i> (2013) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012)
RESOM	4	+	-	Sulman <i>et al.</i> (2018) ; Tang et Riley (2015)
REV	3	+	-	Sihi <i>et al.</i> (2016)
Romul Hum	5	-	-	Komarov <i>et al.</i> (2017) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012)
RothC	5	+	±	Afzali <i>et al.</i> (2019) ; Barančíková <i>et al.</i> (2010) ; Bleuler <i>et al.</i> (2017) ; Cagnarini <i>et al.</i> (2019) ; Dechow <i>et al.</i> (2019) ; Farina <i>et al.</i> (2013, 2017) ; Francaviglia <i>et al.</i> (2012, 2013) ; González Hidalgo <i>et al.</i> (2018) ; González Molina <i>et al.</i> (2014, 2016, 2018) ; Heikkinen <i>et al.</i> (2014) ; Herbst <i>et al.</i> (2018) ; Jebari <i>et al.</i> (2018) ; Klumpp <i>et al.</i> (2016) ; Lee <i>et al.</i> (2020) ; Leite <i>et al.</i> (2011) ; Li <i>et al.</i> (2011a, 2016b) ; Ludwig <i>et al.</i> (2010) ; Meersmans <i>et al.</i> (2013) ; Mishra <i>et al.</i> (2019) ; Mondini <i>et al.</i> (2012, 2017) ; Montiel <i>et al.</i> (2019) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012) ; Peltre <i>et al.</i> (2012) ; Rampazzo Todorovic <i>et al.</i> (2010) ; Riggers <i>et al.</i> (2019) ; Senapati <i>et al.</i> (2014) ; Singh et Benbi (2020) ; Studdert <i>et al.</i> (2011) ; Yokozawa <i>et al.</i> (2010)
SCAMPS	8	+	+	Sistla <i>et al.</i> (2014)
SHIMMER	4	+	+	Bradley <i>et al.</i> (2015)
Simple	4	+	+	Perveen <i>et al.</i> (2014)
single-microbial	4	-	-	Buchkowski <i>et al.</i> (2015)
SOMDY	5	-	-	Mazzoleni <i>et al.</i> (2012)
SOMic 1.0.	5	-	-	Woolf et Lehmann (2019)
SOMPPOF	4	+	+	Braakhekke <i>et al.</i> (2014)
SYMPHONY	5	+	-	Perveen <i>et al.</i> (2014)
Yasso07	6	-	-	Heikkinen <i>et al.</i> (2014) ; Ortiz <i>et al.</i> (2013) ; Palosuo <i>et al.</i> (2012) ; Riggers <i>et al.</i> (2019)

Tableau 3 - Pourcentage (%) entre la présence explicite ou non du compartiment BM et la réponse présentée ou évaluée dans les articles.

Table 3 - Percentage (%) between the explicit presence or not of the BM compartment and the response presented or evaluated in the articles.

Réponse présentée ou évaluée	Biomasse microbienne explicite (CBM)	
	Non	Oui
BM		18
Biomasses de bactéries et champignons		2,6
Macrofaune		1,6
CO ₂ respiré	5,9	12,4
Carbone organique dissout	0,3	5,9
Carbone organique du sol	17,3	36,9

Tableau 4 - Pourcentage (%) de modèles avec la présence explicite ou non du compartiment BM selon le nombre de compartiments. CBM représente le carbone de la biomasse microbienne, NBM l'azote de la biomasse microbienne.

Table 4 - Percentage (%) between the explicit presence or not of the BM compartment and the number of compartments. carbon of the microbial biomass CBM and nitrogen of the microbial biomass NBM.

Nombre de compartiments	Biomasse microbienne explicite		
	CBM		
	Non	Oui	
	NBM		
	Non	Oui	Non
1	0,3		
2	3,9	1,3	
3	4,9	5,54	0,33
4	1,3	16,3	1,95
5	11	10,4	3,58
6	0,3	6,51	2,28
7		0,65	0,98
8	0,7	1,95	0,98
9	1,3	0,98	0,33
10		3,91	
11		9,45	2,61
13		6,51	

En ce qui concerne les prédictions, dans les articles examinés, il est observé qu'avec les modèles qui intègrent BM, les auteurs ont tendance à ne pas présenter de prédictions. Inversement, les modèles qui présentent des prédictions sont ceux qui ont tendance à moins incorporer explicitement BM (Tableau 6).

DISCUSSION

Microorganismes et cycles C et N

Le nombre de modèles publiés depuis 2010 est similaire à celui trouvé par Manzoni et Porporato (2009) et semble assez stable comme le montrent aussi Campbell et Paustian (2015). Notre étude recense 74 publications comme celle de 2009 avec seulement 22 % des mêmes modèles utilisés dans les deux études. Parmi les 3 modèles les plus référencés, RothC et Momos intègrent la BM en lui donnant (Momos) ou non (RothC) un rôle fonctionnel, Century ne l'intègre pas explicitement.

L'incorporation explicite de BM a également augmenté ces dernières années. Manzoni et Porporato (2009) rapportaient qu'environ 57 % des références examinées incluaient au moins un compartiment BM, depuis 2010 le pourcentage est passé à 76,5 %. Selon divers auteurs, l'incorporation des microorganismes génère une meilleure explication prédictive de la variabilité des résultats, ainsi qu'une réponse plus solide face aux scénarii de changement climatique (Wieder *et al.*, 2015).

Il existe aussi des controverses sur l'incorporation de microorganismes dans les modèles et des évaluations de l'effet du changement climatique sur les processus de décomposition sont nécessaires. Quel sera l'effet de l'adaptation sur l'efficacité de ces microorganismes? Quels groupes microbiens vont prévaloir dans le sol (Wieder *et al.*, 2013)? Comment mieux lier les fluctuations des cycles C et N à long terme aux fluctuations microbiennes à très court terme (Fujita *et al.*, 2014)? Les microorganismes peuvent-ils générer des oscillations irréalistes à des perturbations rapides de l'environnement (Hararuk *et al.*, 2015)? Cependant, ces préoccupations ne sont guère étayées par des données actuellement.

Biodiversité du sol et cycles C et N

Les communautés microbiennes interagissent non seulement avec leur environnement le plus proche, mais aussi avec d'autres organismes du sol c'est pourquoi différentes investigations mettent en évidence le rôle actif des microbes au côté ou à l'intérieur de ces organismes (Blanchart *et al.*, 2009; Pennanen *et al.*, 2019).

En ce sens, on observe que seuls les modèles d'écosystème T&C-BG (Fatichi *et al.*, 2019) et Momos (Kherif *et al.*, 2021) intègrent ce type de relation. Cependant le processus évolutif

Tableau 5 - Equations les plus utilisées (%) dans les modèles présentant explicitement ou non le compartiment BM. CBM est le carbone de la biomasse microbienne, NBM est l'azote de la biomasse microbienne.

Table 5 - Percentage (%) between the explicit presence or not of the BM compartment and the equations used. carbon of the microbial biomass CBM and nitrogen of the microbial biomass NBM.

Équation	Biomasse microbienne explicite		
	CBM		
	Non	Oui	
	NBM		
	Non	Oui	Non
Arrhenius		1,6	0,6
Arrhenius/Michaelis-Menten		1,9	0,3
Approximation des équilibres chimiques		1,3	
Réactions enzyme-substrat		1	
Premier ordre	20,5	36,2	9,1
Second ordre		0,3	
Linéaire	0,6		
Logistique		1,3	
Michaelis-Menten	1,3	19,2	2,9
Monod		1	
Multiplicative	0,6		
Régressive	0,3		

de leurs propositions a été différent. Ecosystem T&C-BG part d'un modèle de végétation et d'eau où d'autres sous-modèles ont ensuite été intégrés, dont celui lié à la biomasse microbienne (Faticchi *et al.*, 2019). Au contraire, MOMOS intègre la biomasse microbienne comme premier lien avec l'écologie fonctionnelle des transformations, pour incorporer ultérieurement d'autres composantes de l'écosystème comme la macrofaune.

D'autres modèles intègrent également des compartiments microbiens, mais qui agissent plutôt comme de simples réservoirs organiques à l'écologie fonctionnelle pas vraiment définie. Différents auteurs proposent maintenant d'examiner le sol plus en détail pour obtenir une meilleure image des propriétés microbiennes, de leurs interactions, de leurs biomasses et de leurs activités à une échelle pertinente pour les microbes, permettant des réponses au niveau de l'écosystème (Baldrian, 2019; Kherif *et al.*, 2021).

Parmi les propriétés microbiennes se trouve celle liée aux caractéristiques des substrats à transformer, qui se reflète généralement en fonction de leur rapport C/N. Les substrats à C/N

Tableau 6 - Pourcentage (%) de modèles présentant une prédiction en relation avec la présence explicite ou non du compartiment BM.

Table 6 - Percentage (%) of models presenting a prediction in relation to the explicit presence or not of the BM compartment.

Prédictions	Biomasse microbienne explicite (CBM)	
	Non	Oui
Non	13,7	47,8
Oui	9,8	28,7

élevé, tels que les plantes ligneuses, se dégradent moins rapidement que les substrats à faible C/N, les vitesses de transformation des substrats étant liées au besoin en azote des microorganismes. Il existe cependant peu de modèles qui intègrent la simulation de NBM en interaction avec N minéral. L'échange entre les BM et ces formes d'azote minéral disponible pourrait être envisagé par deux voies possibles. La première voie utilise l'hypothèse d'un seuil constant de C/N de BM (homéostasie microbienne), un C/N microbien au-dessus du seuil conduisant à une immobilisation microbienne d'azote minéral, un C/N inférieur provoquant la minéralisation microbienne de l'azote organique. La seconde voie est de considérer un seuil variable du C/N microbien. Il refléterait mieux l'activité mycélienne au début de la décomposition des ligneux suivie par l'activité bactérienne par la suite. Cette deuxième voie induit le risque d'une perte de parcimonie dans le paramétrage du modèle, le seuil variable C/N nécessite au minimum (variation linéaire) un paramètre de plus que le seuil constant (Pansu *et al.*, 2018).

Biodiversité des sols et parcimonie des équations prédictives

La complexité du modèle doit être basée sur le principe de parcimonie encore appelé rasoir d'Ockham (Gao *et al.*, 2020). Parmi les modèles qui ajustent les flux de façon acceptable, et même avec des ajustements tous statistiquement parfaits, celui qui nécessite le moins de paramètres sera retenu, ceci correspondant également aux critères d'Akaike. RothC, Century et Momos présentent le même nombre de compartiments, cependant ils utilisent un nombre différent de paramètres, dix, treize et sept respectivement. Momos s'avère le plus parcimonieux pour modéliser l'évolution des MOS (Pansu *et al.*, 2009).

La littérature scientifique montre l'effort important porté sur la cinétique d'évolution des formes du C et N dans le sol. Dans la plupart des cas, chaque compartiment proposé par les différents modèles regroupe des composés qui partagent un temps de séjour moyen similaire (Menichetti *et al.*, 2016) lié à sa vitesse de décomposition k (Davidson et Janssens, 2006). Par exemple, les modèles RothC et Century (Mondini *et al.*, 2017; Zhang *et*

al., 2018) utilisent des équations du premier ordre pour tous les flux, avec un flux respiratoire proportionnel à BM. Au contraire, le modèle Momos intègre des équations du premier ordre pour la plupart des flux avec une équation du second ordre pour la respiration microbienne, indiquant que l'activité des microorganismes varie en même temps que leur biomasse (Pansu *et al.*, 2010, 2014). Cette équation pourrait générer des réponses chaotiques du modèle, mais des analyses mathématiques montrent sa bonne adaptation à différentes conditions environnementales en évitant les risques de chaos (Hammoudi *et al.*, 2015, 2017; Hammoudi et Iosifescu, 2018).

Cinétiques et environnement

Les modèles intègrent un ajustement de la vitesse des processus de transformation de la MOS sous l'effet de différents facteurs environnementaux climatiques, chimiques et physiques du sol (Müller et Höper, 2004). La régulation par l'effet température est présente dans la plupart des modèles, c'est un facteur important dans la dynamique de la MOS (Dessureault-Rompré *et al.*, 2010) qui affecte directement l'activité des microorganismes et indirectement l'humidité du sol et la quantité et la qualité des restitutions organiques de la photosynthèse qui entrent dans le processus de décomposition (Luo et Zhou, 2006).

Parmi les processus d'évolution des taux de transformation de la MOS, l'un des plus discutés dans les modèles correspond à l'effet "priming" (Bernard *et al.*, 2022; Craine et Gelderman, 2011; Kuzyakov, 2010). Celui-ci correspond à une augmentation de la décomposition de la MOS due à l'entrée d'un substrat labile ayant une très faible teneur en N ou n'en contenant pas. Dans ce cas, selon l'hypothèse *nutrient mining*, les microorganismes obtiennent de la MOS le N nécessaire aux processus de transformation.

Au cours des dernières décennies, cet effet d'amorçage était basé uniquement sur le besoin de N par les microorganismes; cependant, ces dernières années, il a été déterminé que cette stimulation de la décomposition de la MOS peut également être due à d'autres éléments requis par les microorganismes lorsqu'ils décomposent des substrats riches en énergie (Xiao *et al.*, 2015). Pourtant, bien que ce mécanisme dans les processus de transformation de la MOS soit recommandé par environ 30 % des auteurs (Huang *et al.*, 2021; Kyker-Snowman *et al.*, 2020), seul un petit groupe l'intègre dans les modèles, moins de 5 % selon Woolf *et al.* (2019). Ceci montre la nécessité de mieux comprendre ce type d'effet sur les microorganismes et comment les modèles peuvent l'introduire.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pouvoir décrire tous les processus de transformation de la MOS est complexe, cette étude nous permet d'en appréhender l'importance par le grand nombre de modèles qui simulent l'évolution du C et N du sol. Elle permet aussi de comparer l'incorporation des microorganismes de manière plus ou moins explicite et fonctionnelle dans ces modèles. Cependant, la différence de fonctionnement des groupes fonctionnels bactériens et mycéliens, ainsi que l'effet de la mésofaune et de la macrofaune, sont peu référencés dans les modèles. Ceci provient peut-être de la complexité nécessairement croissante des simulations qui éloigne de la parcimonie liée aux paramètres des systèmes d'équations.

L'étude des communautés basée sur des traits fonctionnels est sans doute une voie pour faciliter la prise en compte de la variabilité des fonctions microbiennes sans augmenter autant le nombre de paramètres, par exemple une non homéostasie de la BM pourrait traduire son évolution depuis une biomasse mycélienne majoritaire vers une biomasse plus bactérienne.

Il reste aussi à modéliser les relations entre BM et d'autres éléments nécessaires à la croissance des plantes, en premier lieu le phosphore déjà pris en compte dans le modèle Century.

L'hétérogénéité constatée dans cette étude au niveau des paramètres évalués (incorporation explicite de microorganismes, nombre de compartiments, lieux et besoins où les modèles se sont développés, entre autres), montre la spécificité de chaque modèle à des conditions particulières. Ceci ne permet pas de générer une inférence d'évolution basée sur la seule synthèse des modèles existants, le nombre et la définition de leurs compartiments et la parcimonie des équations proposées. La modélisation ouvre pourtant tout un éventail de possibilités pour prédire les cycles biogéochimiques en relation avec une gestion agricole et forestière plus respectueuse de l'environnement et son effet sur l'atténuation du réchauffement climatique de la planète.

REMERCIEMENTS

Cet article est une contribution au programme européen DiVicia (Numéro de référence: 2019-SECTION2-9): Utilisation et gestion des espèces de Vicia pour la durabilité et la résilience dans les systèmes agricoles basés sur la biodiversité.

BIBLIOGRAPHIE

- Abramoff R., Xu X., Hartman M., O'Brien S., Feng W., Davidson E., Finzi A., Moorhead D., Schimel S., Torn M., Mayes M, 2017a - The Millennial model: in search of measurable pools and transformations for modeling soil carbon in the new century. *Biogeochemistry*. 137(1-2), 51-71. doi:10.1007/s10533-017-0409-7
- Abramoff R.Z., Davidson E.A., Finzi A.C, 2017b - A parsimonious modular approach to building a mechanistic belowground carbon and nitrogen model, *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 122, 2418–2434, doi:10.1002/2017JG003796

- Abs E., Saleska S., Ferrière R, 2019 - Microbial evolution reshapes soil carbon feedbacks to climate change. *bioRxiv*. doi:10.1101/641399
- Abs E., Leman H., Ferrière R.A, 2020 - Multi-scale eco-evolutionary model of cooperation reveals how microbial adaptation influences soil decomposition. *Commun. Biol.*, 3, 520. doi:10.1038/s42003-020-01198-4
- Afzali S.F., Azad B., Golabi M.H., Francaviglia R, 2019 - Using RothC Model to Simulate Soil Organic Carbon Stocks under Different Climate Change Scenarios for the Rangelands of the Arid Regions of Southern Iran. *Water*, 11, 2107. doi:10.3390/w11102107
- Almulqu A., Boonyanuph J, 2017 - Dynamic simulation of carbon stocks in tropical lowland savanna in East Nusa Tenggara, Indonesia. *Naresuan University Journal: Science And Technology (NUJST)*, 25(4), 51-68.
- Ahrens B., Reichstein M., Borken W., Muhr J., Trumbore S.E., Wutzler T, 2014 - Bayesian calibration of a soil organic carbon model using $\Delta^{14}\text{C}$ measurements of soil organic carbon and heterotrophic respiration as joint constraints, *Biogeosciences*, 11, 2147–2168, doi:10.5194/bg-11-2147-2014
- Ahrens B., Braakhekke M.C., Guggenberger G., Schrumpp M., Reichstein M, 2015 - Contribution of sorption, DOC transport and microbial interactions to the ^{14}C age of a soil organic carbon profile: Insights from a calibrated process model. *Soil Biol. Biochem.*, 88, 390-402, doi:10.1016/j.soilbio.2015.06.008
- Aitkenhead M.J., Albanito F., Jones M.B., Black H.I.J, 2011 - Development and testing of a process-based model (MOSES) for simulating soil processes, functions and ecosystem services. *Ecol. Modell.*, 222(20-22), 3795-3810. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.09.014
- Albers A., Avadí A., Benoist A., Collet P., Hélias A, 2020) Modelling dynamic soil organic carbon flows of annual and perennial energy crops to inform energy-transport policy scenarios in France. *Sci Total Environ.* 20 718:135278. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135278
- Allison S.D, 2012 - A trait-based approach for modelling microbial litter decomposition. *Ecol Lett*, 15: 1058-1070. doi:10.1111/j.1461-0248.2012.01807.x
- Allison S.D, 2014 - Modeling adaptation of carbon use efficiency in microbial communities. *Front. Microbiol.*, 5:571. doi:10.3389/fmicb.2014.00571
- Allison S.D., Wallenstein M.D., Bradford M.A, 2010 - Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology. *Nat. Geosci.*, 3(5), 336-340. doi:10.1038/ngeo846
- Baldrian P, 2019 - The known and the unknown in soil microbial ecology, *FEMS Microbiol. Ecol.*, 95(2), fiz005, doi:10.1093/femsec/fiz005
- Barančíková G., Halás J., Gutteková M., Makovníková J., Nováková M., Skalský R., Tarasovičová Z, 2010 - Application of RothC model to predict soil organic carbon stock on agricultural soils of Slovakia. *Soil Water Res.*, 5: 1-9. doi:10.17221/23/2009-SWR
- Basso B., Gargiulo O., Paustian K., Robertson G.P., Porter C., Grace P.R., Jones J.W, 2011 - Procedures for Initializing Soil Organic Carbon Pools in the DSSAT-CENTURY Model for Agricultural Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75: 69-78. doi:10.2136/sssaj2010.0115
- Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D., Fanin F., Fontaine S., Guenet B., Karimi B., Marsden C., Pierre-Alain Maron (2022) What is the Priming effect, how is it generated and how will it impact soil carbon sequestration in a future submitted to global change? *Funct. Ecol.*, sous presse
- Bista P., Machado S., Ghimire R., Del Grosso S.J., Reyes-Fox M, 2016 - Simulating Soil Organic Carbon in a Wheat–Fallow System Using the Daycent Model. *Agron. J.*, 108: 2554-2565. doi:10.2134/agronj2016.04.0202
- Blanchart E., Marilleau N., Chotte J.L., Drogoul A., Perrier E., Cambier C.H, 2009 - SWORM: an agent-based model to simulate the effect of earthworms on soil structure. *Eur. J. Soil Sci.* 60(1), 13-21. doi: 10.1111/j.1365-2389.2008.01091.x
- Bleuler M., Farina R., Francaviglia R., di Bene C., Napoli R., Marchetti A, 2017 - Modelling the impacts of different carbon sources on the soil organic carbon stock and CO₂ emissions in the Foggia province (Southern Italy). *Agric. Syst.*, 157, 258-268. doi:10.1016/j.agsy.2017.07.017
- Bolinder M.A., Kätterer T., Andrén O., Parent L.E, 2012) Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Can. J. Soil Sci.*, 92(6): 821-833. doi:10.4141/cjss2012-036
- Bosco S., Di Bene C., Galli M., Remorini D., Massai R., Bonari E, 2013 - Soil organic matter accounting in the carbon footprint analysis of the wine chain. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18(5), 973-989. doi: 10.1007/s11367-013-0567-3
- Bortolon E.S.O., Mielniczuk J., Tornquist C.G., Lopes F., Bergamaschi H, 2011 - Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma*, 167, 156-166. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.008.
- Braakhekke M.C., Beer C., Schrumpp M., Ekici A., Ahrens B., Hoosbeek M.R., Kabat P., Reichstein M, 2014 - The use of radiocarbon to constrain current and future soil organic matter turnover and transport in a temperate forest. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 119(3), 372-391, doi:10.1002/2013JG002420.
- Bradley J.A., Anesio A.M., Singarayer J.S., Heath M.R., Arndt S, 2015 - SHIMMER (1.0): a novel mathematical model for microbial and biogeochemical dynamics in glacier forefield ecosystems, *Geosci. Model Dev.*, 8, 3441–3470, doi:10.5194/gmd-8-3441-2015
- Brandani C.B., Abbruzzini T.F., Williams S., Easter M., Pellegrino Cerri C.E., Paustian K, 2015 - Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, 7: 646–657. doi:10.1111/gcbb.12175
- Brangari A.C., Manzoni S., Rousk J, 2020 - A soil microbial model to analyze decoupled microbial growth and respiration during soil drying and rewetting. *Soil Biol. Biochem.*, 148, 107871. doi:10.1016/j.soilbio.2020.107871
- Buchkowski R.W., Schmitz O.J., Bradford M.A, 2015 - Microbial stoichiometry overrides biomass as a regulator of soil carbon and nitrogen cycling. *Ecology*, 96(4), 1139-1149. doi:10.1890/14-1327.1
- Buysse P., Aubinet M, 2010 - La respiration hétérotrophe dans les sols agricoles : description des facteurs importants et comparaison de modèles semi-mécanistes existants. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 14(4):707–717. <http://hdl.handle.net/2268/81459>
- Caddeo A., Marras S., Sallustio L., Spano D., Sirca C, 2019 - Soil organic carbon in Italian forests and agroecosystems: Estimating current stock and future changes with a spatial modelling approach. *Agric. For. Meteorol.*, 278, 107654. doi:10.1016/j.agrformet.2019.107654
- Cagnarini C., Renella G., Mayer J., Hirte J., Schulin R., Costerousse B., Della A.M., Orlandini S., Menichetti L, 2019 - Multi-objective calibration of RothC using measured carbon stocks and auxiliary data of a long-term experiment in Switzerland. *Eur. J. Soil Sci.*, 70(4), 819-832. doi:10.1111/ejss.12802
- Camino-Serrano M., Guenet B., Luysaert S., Ciais P., Bastrikov V., Vos B.D., Gielen B., Gleixner G., Jornet-Puig A., Kaiser K., Kothawala D., Lauerwald R., Peñuelas J., Schrumpp M., Vicca S., Vuichard N., Walmsley D., Janssens I.A, 2018 - ORCHIDEE-SOM: modeling soil organic carbon (SOC) and dissolved organic carbon (DOC) dynamics along vertical soil profiles in Europe. *Geosci. Model Dev.*, 11(3), 937-957. doi:10.5194/gmd-11-937-2018
- Camino-Serrano M., Tifafi M., Balesdent J., Hatté C., Peñuelas J., Cornu S., Guenet B, 2019 - Including stable carbon isotopes to evaluate the dynamics of soil carbon in the land-surface model ORCHIDEE. *J. Adv. Model. Earth Sy.*, 11. doi:10.1029/2018MS001392
- Campbell E.E., Parton W.J., Soong J.L., Paustian K., Hobbs N.T., Cotrufo M.F, 2016 - Using litter chemistry controls on microbial processes to partition litter carbon fluxes with the Litter Decomposition and Leaching (LIDEL) model. *Soil Biol. Biochem.*, 100, 160-174. doi:10.1016/j.soilbio.2016.06.007

- Campbell E.E., Paustian K, 2015 - Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. *Environ. Res. Lett.*, 10(12), 123004. doi:10.1088/1748-9326/10/12/123004
- Carbone M.S., Richardson A.D., Chen M., Davidson E.A., Hughes H., Savage K.E., Hollinger D.Y, 2016 - Constrained partitioning of autotrophic and heterotrophic respiration reduces model uncertainties of forest ecosystem carbon fluxes but not stocks. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(9), 2476-2492. doi:10.1002/2016JG003386
- Cardinael R., Eglin T., Guenet B., Neill C., Houot S., Chenu C, 2015 - Is priming effect a significant process for long-term SOC dynamics? Analysis of a 52-years old experiment. *Biogeochemistry*, 123(1), 203-219. doi: 10.1007/s10533-014-0063-2
- Cayuela M.L., Sinicco T., Mondini C, 2009 - Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil. *Appl. Soil Ecol.*, 41:118–127. doi:10.1016/j.apsoil.2008.10.001
- Cerioti G., Tang F.H.M., Maggi F, 2020 - Similarities and differences in the sensitivity of soil organic matter (SOM) dynamics to biogeochemical parameters for different vegetation inputs and climates. *Environ. Res. Risk Assess.*, 34(12), 2229-2244. doi:10.1007/s00477-020-01868-z
- Chalhoub M., Garnier P., Coquet Y., Mary B., Lafolie F., Houot S, 2013 - Increased nitrogen availability in soil after repeated compost applications: Use of the PASTIS model to separate short and long-term effects. *Soil Biol. Biochem.*, 65, 144-157. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.05.023
- Chen Y., Chen J., Luo Y, 2019 - Data-driven ENZYme (DENZY) model represents soil organic carbon dynamics in forests impacted by nitrogen deposition. *Soil Biol. Biochem.*, 138, 107575. doi:10.1016/j.soilbio.2019.107575
- Clivot H., Mouny J.C., Duparque A., Dinh J.L., Denoroy P., Houot S., Vertés F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B, 2019 - Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environ. Model. Softw.*, 118, 99-113. doi:10.1016/j.envsoft.2019.04.004
- Cong R., Wang X., Xu M., Ogle S.M., Parton W.J, 2014 - Evaluation of the CENTURY Model Using Long-Term Fertilization Trials under Corn-Wheat Cropping Systems in the Typical Croplands of China. *PLoS ONE*, 9(4): e95142. doi:10.1371/journal.pone.0095142
- Craine J., Gelderman T, 2011 - Soil moisture controls on temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition for a mesic grassland. *Soil Biol. Biochem.*, 43(2): 455–457. doi:10.1016/j.soilbio.2010.10.011
- Davidson E.A., Janssens I, 2006 - Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440:165–173. doi:10.1038/nature04514
- De Bruijn A.M., Butterbach-Bahl K, 2010 - Linking carbon and nitrogen mineralization with microbial responses to substrate availability—the DECONIT model. *Plant Soil*, 328(1), 271-290. doi:10.1007/s11104-009-0108-9
- Dechow R., Franko U., Kätterer T., Kolbe H, 2019 - Evaluation of the RothC model as a prognostic tool for the prediction of SOC trends in response to management practices on arable land. *Geoderma*, 337, 463-478. doi:10.1016/j.geoderma.2018.10.001
- Del Grosso S.J., Gollany H.T., Reyes-Fox M, 2016 - Simulating soil organic carbon stock changes in agroecosystems using CQESTR, DayCent, and IPCC Tier 1 methods. Synthesis and modeling of greenhouse gas emissions and carbon storage in agricultural and forest systems to guide mitigation and adaptation, 6, 89-110. doi:10.2134/advagricsystmodel6.2013.0001.5
- Dessureault-Rompré J., Zebarth B.J., Georgallas A., Burton D.L., Grant C.A., Drury C.F, 2010 - Temperature dependence of soil nitrogen mineralization rate: comparison of mathematical models, reference temperatures and origin of the soils. *Geoderma*, 157:97–108. doi:10.1016/j.geoderma.2010.04.001
- Dilly O, 2001 - Microbial respiratory quotient during basal metabolism and after glucose amendment in soils and litter. *Soil Biol. Biochem.*, 33:117–127. doi:10.1016/S0038-0717(00)00123-1
- Dimassi B., Guenet B., Saby N.P., Munoz F., Bardy M., Millet F., Martin M.P, 2018 - The impacts of CENTURY model initialization scenarios on soil organic carbon dynamics simulation in French long-term experiments. *Geoderma*, 311, 25-36. doi:10.1016/j.geoderma.2017.09.038
- Dwivedi D., Riley W.J., Torn M.S., Spycher N., Maggi F., Tang J.Y, 2017 - Mineral properties, microbes, transport, and plant-input profiles control vertical distribution and age of soil carbon stocks. *Soil Biol. Biochem.*, 107, 244-259. doi:10.1016/j.soilbio.2016.12.019
- Fan X., Gao D., Zhao C., Wang C., Qu Y., Zhang J., Bai E, 2021 - Improved model simulation of soil carbon cycling by representing the microbially derived organic carbon pool. *The ISME J.*, 1-16. doi:10.1038/s41396-021-00914-0
- Farina R., Coleman K., Whitmore A.P, 2013 - Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. *Geoderma*, 200, 18-30. doi:10.1016/j.geoderma.2013.01.021
- Farina R., Marchetti A., Francaviglia R., Napoli R., Di Bene C, 2017 - Modeling regional soil C stocks and CO2 emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 238, 128-141. doi:10.1016/j.agee.2016.08.015
- Fatichi S., Manzoni S., Or D., Paschalis A, 2019 - A mechanistic model of microbially mediated soil biogeochemical processes: a reality check. *Global Biogeochem. Cycles*, 33(6), 620-648. doi:10.1029/2018GB006077
- Francaviglia R., Baffi C., Nassisi A.L., Cassinari C., Farina R, 2013 - Use of the "RothC" model to simulate soil organic carbon dynamics on a silty-loam inceptisol in northern Italy under different fertilization practices. *EQA* 11, 17-28. doi:10.6092/issn.2281-4485/4085
- Francaviglia R., Coleman K., Whitmore A.P., Doro L., Urracci G., Rubino M., Ledda L, 2012 - Changes in soil organic carbon and climate change—Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agric. Syst.*, 112, 48-54. doi:10.1016/j.agsy.2012.07.001
- Franko U., Merbach I, 2017 - Modelling soil organic matter dynamics on a bare fallow Chernozem soil in Central Germany. *Geoderma*, 303, 93-98. doi:10.1016/j.geoderma.2017.05.013
- Franko U., Spiegel H, 2016 - Modeling soil organic carbon dynamics in an Austrian long-term tillage field experiment. *Soil Tillage Res.*, 156, 83-90. doi:10.1016/j.still.2015.10.003
- Fujita Y., Witte J.P.M., van Bodegom P.M, 2014 - Incorporating microbial ecology concepts into global soil mineralization models to improve predictions of carbon and nitrogen fluxes. *Global Biogeochem. Cycles*, 28, 223–238. doi:10.1002/2013GB004595.
- Gao J., Mikutta R., Jansen, B., Guggenberger G., Vogel C., Kalbitz K, 2020 - The multilayer model of soil mineral–organic interfaces—a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 183: 27-41. doi:10.1002/jpln.201900530
- Georgiou K., Abramoff R.Z., Harte J., Riley W.J., Torn M.S, 2017 - Microbial community-level regulation explains soil carbon responses to long-term litter manipulations. *Nature Communications*, 8(1), 1-10. doi:10.1038/s41467-017-01116-z
- German D.P., Marcelo K.R., Stone M.M., Allison S.D, 2012 - The Michaelis–Menten kinetics of soil extracellular enzymes in response to temperature: a cross-latitudinal study. *Glob. Chang. Biol.*, 18(4), 1468-1479. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02615.x
- Glanville H.C., Hill P.W., Schnepf A., Oburger E., Jones D.L, 2016 - Combined use of empirical data and mathematical modelling to better estimate the microbial turnover of isotopically labelled carbon substrates in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 94, 154-168. doi:10.1016/j.soilbio.2015.11.016
- Gollany H.T, 2016 - CQESTR simulation of dryland agroecosystem soil organic carbon changes under climate change scenarios. Synthesis and Modeling of Greenhouse Gas Emissions and Carbon Storage in Agricultural and Forest Systems to Guide Mitigation and Adaptation. *Advances in Agricultural*, 59-87. doi:10.2134/advagricsystmodel6.2013.0004
- Gollany H.T., Novak J.M., Liang Y., Albrecht S.L., Rickman R.W., Follett R.F., Wilhelm W.W., Hunt P.G, 2010 - Simulating soil organic carbon dynamics

- with residue removal using the CQESTR model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74(2), 372-383. doi:10.2136/sssaj2009.0086
- Gollany H.T., Fortuna A.M., Samuel M.K., Young F.L., Pan W.L., Pecharko M., 2013 - Soil organic carbon accretion vs. sequestration using physico-chemical fractionation and CQESTR simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77(2), 618-629. doi:10.2136/sssaj2012.0303
- Gollany H.T., Elnaggar A.A., 2017 - Simulating soil organic carbon changes across toposequences under dryland agriculture using CQESTR. *Ecol. Model.*, 355, 97-104. doi:10.1016/j.ecolmodel.2017.03.024
- González Hidalgo M., 2018 - Simulación de la dinámica del carbono orgánico del suelo frente al cambio climático en Matanzas. *Revista Ingeniería Agrícola*, 6(3), 54-59.
- González Molina L., Etchevers Barra J.D., Paz Pellat F., Carrillo Anzures F., Acosta Mireles M., Báez Pérez A., 2016 - Desempeño del modelo Rothc-26.3 a nivel de parcela en México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 357-366.
- González Molina L., Acosta Mireles M., Carrillo Anzures F., Báez Pérez A., González Camacho J.M., 2014 - Cambios de carbono orgánico del suelo bajo escenarios de cambio de uso de suelo en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(7), 1275-1285.
- González Molina L., Mireles M.A., Anzures F.C., Sánchez A.R., 2018 - Simulación de los cambios de carbono orgánico del suelo en especies tropicales arbóreas con el modelo RothC 26.3. *Interciencia*, 43(4), 269-274.
- Gurung R.B., Ogle S.M., Breidt F.J., Williams S.A., Parton W.J., 2020 - Bayesian calibration of the DayCent ecosystem model to simulate soil organic carbon dynamics and reduce model uncertainty. *Geoderma*, 376, 114529. doi:10.1016/j.geoderma.2020.114529
- Hagerty S.B., Allison S.D., Schimel J.P., 2018 - Evaluating soil microbial carbon use efficiency explicitly as a function of cellular processes: implications for measurements and models. *Biogeochemistry*, 140(3), 269-283. doi:10.1007/s10533-018-0489-z(0123456789)
- Hammoudi A., Iosifescu O., Bernoux M., 2015 - Mathematical Analysis of a Nonlinear Model of Soil Carbon Dynamics. *Differ. Equ. Dyn. Syst.*, 23(4), 453-466. doi:10.1007/s12591-014-0227-5
- Hammoudi A., Iosifescu O., Bernoux M., 2017 - Mathematical analysis of a spatially distributed soil carbon dynamics model. *Anal. Appl.*, 15(06), 771-793. doi: 10.1142/S0219530516500081.
- Hammoudi A., Iosifescu O., 2018 - Mathematical Analysis of a Chemotaxis-Type Model of Soil Carbon Dynamic. *Chinese Ann. Math.*, 39: 253-280. doi:10.1007/s11401-018-1063-7.
- Hararuk O., Smith M.J., Luo Y., 2015 - Microbial models with data-driven parameters predict stronger soil carbon responses to climate change. *Glob Change Biol*, 21: 2439-2453. doi:10.1111/gcb.12827.
- He Y., Zhuang Q., Harden J.W., McGuire A.D., Fan Z., Liu Y., Wickland K.P., 2014 - The implications of microbial and substrate limitation for the fates of carbon in different organic soil horizon types of boreal forest ecosystems: a mechanistically based model analysis. *Biogeosciences*, 11(16), 4477-4491. doi:10.5194/bg-11-4477-2014
- He Y., Yang J., Zhuang Q., Harden J.W., McGuire A.D., Liu Y., Wang G., Gu L., 2015), Incorporating microbial dormancy dynamics into soil decomposition models to improve quantification of soil carbon dynamics of northern temperate forests. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 120, 2596-2611, doi:10.1002/2015JG003130
- He L., Lipson D. A., Mazza Rodrigues J.L., Mayes M., Björk R.G., Glaser B., Thornton P., Xu X., 2021a - Dynamics of Fungal and Bacterial Biomass Carbon in Natural Ecosystems: Site-Level Applications of the CLM-Microbe Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13(2), e2020MS002283. doi:10.1029/2020MS002283
- He L., Lai C.T., Mayes M.A., Murayama S., Xu X., 2021b. Microbial seasonality promotes soil respiratory carbon emission in natural ecosystems: A modeling study. *Glob. Chang. Biol.*, 28. 3035-3051. doi:10.1111/gcb.15627
- Heikkinen J., Kurganova I., de Gerenyu V.L., Palosuo T., Regina K., 2014 - Changes in soil carbon stock after cropland conversion to grassland in Russian temperate zone: measurements versus model simulation. *Nutr. Cycl. agroecosystems*, 98(1), 97-106. doi:10.1007/s10705-014-9599-8
- Herbst M., Welp G., Macdonald A., Jate M., Hädicke A., Scherer H., Gaiser T., Herrmann F., Amelung W., Vanderborght J., 2018 - Correspondence of measured soil carbon fractions and RothC pools for equilibrium and non-equilibrium states. *Geoderma*, 314, 37-46. doi:10.1016/j.geoderma.2017.10.047
- Huang Y., Guenet B., Ciais P., Janssens I.A., Soong J.L., Wang Y., Goll D., Blagodatskaya E., Huang Y., 2018 - ORCHIMIC (v1. 0), a microbe-mediated model for soil organic matter decomposition. *Geosci. Model Dev.*, 11(6), 2111-2138. doi:10.5194/gmd-11-2111-2018
- Huang Y., Guenet B., Wang Y.L., Ciais P., 2021 - Global simulation and evaluation of soil organic matter and microbial carbon and nitrogen stocks using the microbial decomposition model ORCHIMIC v2. 0. *Global Biogeochem. Cycles*, e2020GB006836. doi:10.1029/2020GB006836
- Hyvönen R., Olsson B.A., Ågren G.I., 2012 - Dynamics of soil C, N and Ca in four Swedish forests after removal of tops, branches and stumps as predicted by the Q model. *Scand. J. For. Res.*, 27(8), 774-786. doi:10.1080/02827581.2012.727025
- Ibrahim H., Gaieb S., Brahim N., Blavet D., Van den Meersche K., Pansu M., 2021 - Modelling the Organic Evolution of a Mediterranean Limestone Soil under Usual Cropping of Durum Wheat and Faba Bean. *Agronomy*, 11(9): 1688. doi:10.3390/agronomy
- Ibrahim H., Hatira A., Pansu M., 2013 - Modelling the functional role of microorganisms in the daily exchanges of carbon between atmosphere, plants and soil. *Procedia Environ. Sci.*, 19, 96-105. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.011
- Ibrahim H., Pansu M., Blavet D., Hatira A., McDonald P., Bernoux M., Drevon J.J., 2016 - Modelling the continuous exchange of carbon between living organisms, the soil and the atmosphere. *Plant soil*, 398(1-2), 381-397. doi:10.1007/s11104-015-2665-4
- Incerti G., Bonanomi G., Giannino F., Carteni F., Spaccini R., Mazzei P., Piccolo A., Mazzoleni S., 2017 - OMDY: a new model of organic matter decomposition based on biomolecular content as assessed by 13 C-CPMAS-NMR. *Plant Soil*, 411(1-2), 377-394. doi:10.1007/s11104-016-3039-2
- Jebari A., Del Prado A., Pardo G., Martín Rodríguez A., Álvaro-Fuentes J., 2018 - Modeling regional effects of climate change on soil organic carbon in Spain. *J. Environ. Qual.*, 47, 644-653. doi:10.2134/jeq2017.07.0294
- Jian S., Li J., Wang G., Kluber L.A., Schadt C.W., Liang J., Mayes M.A., 2020 - Multi-year incubation experiments boost confidence in model projections of long-term soil carbon dynamics. *Nat. commun.*, 11(1), 1-9. doi:10.1038/s41467-020-19428-y
- Kemanian A.R., Stöckle C.O., 2010 - C-Farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles. *Eur. J. Agron.*, 32(1), 22-29. doi:10.1016/j.eja.2009.08.003
- Khalil M.I., Fornara D.A., Osborne B., 2020 - Simulation and validation of long-term changes in soil organic carbon under permanent grassland using the DNDC model. *Geoderma*, 361, 114014. doi:10.1016/j.geoderma.2019.114014
- Kherif O., Keskes M.I., Pansu M., Ouaret W., Rebouh Y.N., Dokukin P., Kucher D., Latati M., 2021 - Agroecological modeling of nitrogen and carbon transfers between decomposer microorganisms, plant symbionts, soil and atmosphere in an intercropping system. *Ecol. Modell.*, 440: 109390. doi:10.1016/j.ecolmodel.2020.109390
- Klump K., Coleman K., Dondini M., Goulding K., Hastings A., Jones M.B., Leifeld L., Osborne B., Saunders M., Scott T., Teh Y. A., Smith P., 2016 - Soil organic carbon (SOC) equilibrium and model initialisation methods: an application to the Rothamsted carbon (RothC) model. *Environ. Model. Assess.*, 22(3), 215-229. doi:10.1007/s10666-016-9536-0

- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E, 2017 - Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing. *Ecol. Modell.*, 345, 113-124. doi:10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007
- Kuzyakov Y, 2010 - Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 42: 1363–1371. doi:10.1016/j.soilbio.2010.04.003
- Kyker-Snowman E., Wieder W.R., Frey S.D., Grandy A.S, 2020 - Stoichiometrically coupled carbon and nitrogen cycling in the Microbial-Mineral Carbon Stabilization model version 1.0 (MIMICS-CN v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 13(9), 4413-4434. doi:10.5194/gmd-13-4413-2020
- Latati M., Rebouh N.Y., Aouiche A., Laouar M, 2019 - Modeling the functional role of the microorganisms in the daily exchanges of carbon and nitrogen in intercropping system under Mediterranean conditions. *Agron. Res.*, 17(2), 559–573. doi:10.15159/AR.19.050
- Laub M., Demyan M.S., Nkwain Y.F., Blagodatsky S., Kätterer T., Piepho H.P., Cadisch G, 2019 - DRIFTS peaks as measured pool size proxy to reduce parameter uncertainty of soil organic matter models. *Biogeosci. Discuss.*, 1-29. doi:10.5194/bg-2019-292
- Laub M., Ali R.S., Demyan M.S., Nkwain Y.F., Poll C., Högy P., Poyda A., Ingwersen J., Blagodatsky S., Kandeler E., Cadisch G, 2021 - Modeling temperature sensitivity of soil organic matter decomposition: Splitting the pools. *Soil Biol. Biochem.*, 153, 108108. doi:10.1016/j.soilbio.2020.108108
- Lee J., ViscarraRossel R.A., Luo Z., Wang Y.P, 2020 - Simulation of soil carbon dynamics in Australia under a framework that better connects spatially explicit data with RothC. *Biogeosci. Discuss.*, 1-24. doi:10.5194/bg-2020-150
- Lehuger S., Gabrielle B., Cellier P., Loubet B., Roche R., Béziat P., Ceschia E., Wattenbach M, 2010 - Predicting the net carbon exchanges of crop rotations in Europe with an agro-ecosystem model. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 139(3), 384-395. doi:10.1016/j.agee.2010.06.011
- Leite L.F.C., Sagrilo E., Maciel G.A., Iwata B.D.F, 2011 - Simulation model to estimate carbon sequestration under management systems in tropical soils of Brazil. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 5(Special Issue 1), 1-6.
- Li D. L., Chan K.Y., Conyers M.K., Li G., Poile G.J, 2011a - Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. *Geoderma*, 165(1), 69-77. doi:10.1016/j.geoderma.2011.07.005
- Li X., Zhang X., Zhao Y., Zhang Y., Shen Z., Wang J., Wu J, 2011b - Dynamics of soil organic carbon in alpine meadow of Tibetan Plateau with CENTURY model. In 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information (Vol. 4, pp. 797-800), IEEE. doi:10.1109/ICBMEI.2011.5921085
- Li D.L., Anwar M.R., O'Leary G., Conyers M.K, 2014a - Managing wheat stubble as an effective approach to sequester soil carbon in a semi-arid environment: Spatial modelling. *Geoderma*, 214, 50-61. doi:10.1016/j.geoderma.2013.10.003
- Li J., Wang G., Allison S.D., Mayes M.A., Luo Y, 2014b - Soil carbon sensitivity to temperature and carbon use efficiency compared across microbial-ecosystem models of varying complexity. *Biogeochemistry*, 119(1), 67-84. doi:10.1007/s10533-013-9948-8
- Li D.L., O'Leary G.J., Ma Y., Cowie A., Li F. Y., McCaskill M., Conyers M., Dalal R., Robertson F., Dougherty W, 2016a - Modelling soil organic carbon 2. Changes under a range of cropping and grazing farming systems in eastern Australia. *Geoderma*, 265, 164-175. doi:10.1016/j.geoderma.2015.11.005
- Li S., Li J., Li C., Huang S., Li X., Li S., Ma Y, 2016b - Testing the RothC and DNDC models against long-term dynamics of soil organic carbon stock observed at cropping field soils in North China. *Soil Tillage Res.*, 163, 290-297. doi:10.1016/j.still.2016.07.001
- Li Z., Yang J.Y., Drury C.F., Yang X.M., Reynolds W.D., Li X., Hu C, 2017 - Evaluation of the DNDC model for simulating soil temperature, moisture and respiration from monoculture and rotational corn, soybean and winter wheat in Canada. *Ecol. Modell.*, 360, 230-243. doi:10.1016/j.ecolmodel.2017.07.013
- Liang Y., Gollany H.T., Rickman R.W., Albrecht S.L., Follett R.F., Wilhelm W.W., Novak J.M., Douglas C.L, 2009 - Simulating soil organic matter with cqestr (v.2.0): Model description and validation against long-term experiments across North America. *Ecol. Modell.*, 220(4): 568–581. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.012
- Lima A.M.N., Silva I.R.D., Stape J.L., Mendonça E.S., Novais R.F., Barros N.F.D., Neves J.C.L., Paul K., Schulthais F., Polgaise P., Raison J., Soares E.M.B, 2011 - Modeling changes in organic carbon stocks for distinct soils in southeastern Brazil after four Eucalyptus rotations using the century model. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 833-847. doi:10.1590/S0100-06832011000300018
- Ludwig B., Hu K., Niu L., Liu X, 2010 - Modelling the dynamics of organic carbon in fertilization and tillage experiments in the North China Plain using the Rothamsted Carbon Model—initialization and calculation of C inputs. *Plant Soil*, 332(1), 193-206. doi:10.1007/s11104-010-0285-6
- Luo Z., Wang E., Fillery I.R., Macdonald L.M., Huth N., Baldock J, 2014 - Modelling soil carbon and nitrogen dynamics using measurable and conceptual soil organic matter pools in APSIM. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 186, 94-104. doi:10.1016/j.agee.2014.01.019
- Luo Z., Wang E., Shao Q., Conyers M.K., Li D.L, 2016 - Confidence in soil carbon predictions undermined by the uncertainties in observations and model parameterisation. *Environ. Model. Softw.*, 80, 26-32. doi:10.1016/j.envsoft.2016.02.013
- Luo Y., Zhou X, 2006 - Soil respiration and the environment. Academic Press Elsevier, San Diego, CA, USA., page 328
- Manzoni S., Porporato A, 2009 - Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales. *Soil Biol. Biochem.*, 41(7), 1355-1379. doi:10.1016/j.soilbio.2009.02.031
- Martínez E., Fuentes J.P., Acevedo E, 2008 - Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.*, 8(1): 68–96. doi:10.4067/S0718-27912008000100006
- Mazzoleni S., Bonanomi G., Giannino F., Incerti G., Piermatteo D., Spaccini R., Piccolo A, 2012 - New modeling approach to describe and predict carbon sequestration dynamics in agricultural soils. In *Carbon Sequestration in Agricultural Soils* (pp. 291-307), Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-23385-2_11
- Meersmans J., Martin M.P., Lacarce E., Orton T.G., de Baets S., Gouirat M., Saby N.P.A., Wetterlind J., Bispo A., Quite T.A., Arrouays D, 2013 - Estimation of soil carbon input in France: An inverse modelling approach. *Pedosphere*, 23(4), 422-436. doi:10.1016/S1002-0160(13)60035-1
- Menichetti L., Kätterer T., Leifeld J, 2016 - Parametrization consequences of constraining soil organic matter models by total carbon and radiocarbon using long-term field data. *Biogeosciences*, 13(10), 3003-3019. doi:10.5194/bg-13-3003-2016
- Mishra G., Jangir A., Francaviglia R, 2019 - Modeling soil organic carbon dynamics under shifting cultivation and forests using Rothc model. *Ecol. Modell.*, 396, 33-41. doi:10.1016/j.ecolmodel.2019.01.016
- Mondini C., Coleman K., Whitmore A.P, 2012 - Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001–2100: Potential for compost amendment. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 153, 24-32. doi:10.1016/j.agee.2012.02.020
- Mondini C., Cayuela M.L., Sinicco T., Fornasier F., Galvez A., Sánchez-Monedero M.A, 2017 - Modification of the RothC model to simulate soil C mineralization of exogenous organic matter. *Biogeosciences*, 14(13), 3253-3274. doi: 10.5194/bg-14-3253-2017

- Montiel F.S., Moreno R., Domínguez G.F., Studdert G.A., 2019 - Validación de RothC para simular cambios en el carbono orgánico edáfico bajo rotaciones mixtas y siembra directa. *Ciencia del suelo*, 37(2), 281-297.
- Moorhead D.L., Lashermes G., Sinsabaugh R.L., 2012 - A theoretical model of C-and N-acquiring exoenzyme activities, which balances microbial demands during decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 53, 133-141. doi:10.1016/j.soilbio.2012.05.011
- Müller T., Höper H., 2004 - Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. *Soil Biol. Biochem.* 36(6): 877-888, doi:10.1016/j.soilbio.2003.12.015
- Muñoz-Rojas M., Jordán A., Zavala L.M., González-Peñaloza F.A., De la Rosa D., Pino-Mejías R., Anaya-Romero M., 2013 - Modelling soil organic carbon stocks in global change scenarios: a CarboSOIL application. *Biogeosciences*, 10(12), 8253-8268. doi:10.5194/bg-10-8253-2013
- Nash P.R., Gollany H.T., Liebigh M.A., Halvorson J.J., Archer D.W., Tanaka D.L., 2018a - Simulated soil organic carbon responses to crop rotation, tillage, and climate change in North Dakota. *J. Environ. Qual.*, 47(4), 654-662. doi:10.2134/jeq2017.04.0161
- Nash P.R., Gollany H.T., Sainju U.M., 2018b - CQESTR-Simulated Response of Soil Organic Carbon to Management, Yield, and Climate Change in the Northern Great Plains Region. *J. Environ. Qual.*, 47(4), 674-683. doi:10.2134/jeq2017.07.0273
- Nash P.R., Gollany H.T., Novak J.M., Bauer P.J., Hunt P.G., Karlen D.L., 2018c). Simulated soil organic carbon response to tillage, yield, and climate change in the southeastern Coastal Plains. *J. Environ. Qual.*, 47(4), 663-673. doi:10.2134/jeq2017.05.0190
- Neill C., 2011 - Impacts of crop residue management on soil organic matter stocks: a modelling study. *Ecol. Modell.*, 222(15), 2751-2760. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.04.029
- Noirot-Cosson P.E., Bréchet L., Gilliot J.M., Eden M., Molina J., Rampon J.N., Gabrielle B., Vaudour E., Vaudour E.H.S., 2013 - Simulation with the NC-SOIL model of carbon and nitrogen dynamics in a loamy soil after various compost applications [Conference poster]. *In RAMIRAN 2013.15th International Conference, Versailles, France, 3-5 June. 2013. Proceedings. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).*
- Noirot-Cosson P. E., Dhaouadi K., Etievant V., Vaudour E., Houot S., 2017 - Parameterisation of the NCSOIL model to simulate C and N short-term mineralisation of exogenous organic matter in different soils. *Soil Biol. Biochem.*, 104, 128-140. doi:10.1016/j.soilbio.2016.10.015
- Noirot-Cosson P.E., Vaudour E., Gilliot J.M., Gabrielle B., Houot S., 2016 - Modelling the long-term effect of urban waste compost applications on carbon and nitrogen dynamics in temperate cropland. *Soil Biol. Biochem.*, 94, 138-153. doi:10.1016/j.soilbio.2015.11.014
- Oelbermann M., Voroney R.P., 2011 - An evaluation of the century model to predict soil organic carbon: examples from Costa Rica and Canada. *Agrofor. Syst.*, 82(1), 37-50. doi:10.1007/s10457-010-9351-6
- O'Leary G.J., Li Liu D., Ma Y., Li F.Y., McCaskill M., Conyers M., Dalal R., Reeves S., Page K., Dang Y.P., Robertson F., 2016 - Modelling soil organic carbon 1. Performance of APSIM crop and pasture modules against long-term experimental data. *Geoderma*, 264, 227-237. doi:10.1016/j.geoderma.2015.11.004
- Ordoñez M.C., Casanova Olaya J.F., Galicia L., Figueroa A., 2020 - Soil Carbon Dynamics under Pastures in Andean Socio-Ecosystems of Colombia. *Agronomy*, 10(4), 507. doi:10.3390/agronomy10040507
- Ortiz C. A., Liski J., Gärdenäs A.I., Lehtonen A., Lundblad M., Stendahl J., Agren G., Karlton E., 2013 - Soil organic carbon stock changes in Swedish forest soils—a comparison of uncertainties and their sources through a national inventory and two simulation models. *Ecol. Modell.*, 251, 221-231. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.12.017
- Palosuo T., Foereid B., Svensson M., Shurpali N., Lehtonen A., Herbst M., Linkosalo T., Ortiz C., Todorovic G.R., Marcinkonis S., Li Ch., Jandl R., 2012 - A multi-model comparison of soil carbon assessment of a coniferous forest stand. *Environ. Model. Softw.*, 35, 38-49. doi:10.1016/j.envsoft.2012.02.004
- Pennanen T., Fritze H., de Boer W., Baldrian P., 2019 - Editorial: special issue on the ecology of soil microorganisms, *FEMS Microbiol. Ecol.*, 95(12) fiz154, doi:10.1093/femsec/fiz154
- Pansu M., Ibrahim H., Hatira A., Brahim N., Drevon J.J., Harmand J.M., Chotte J.L., Blavet D., 2018 - Modelling the continuous exchange of Nitrogen between microbial decomposers, the organs and symbionts of plants, the soil reserves and the atmosphere. *Soil Biol. Biochem.*, 125 185-196, doi:10.1016/j.soilbio.2018.06.011
- Pansu M., Machado D., Bottner P., Sarmiento L., 2014 - Modelling microbial exchanges between forms of soil nitrogen in contrasting ecosystems, *Biogeosciences*, 11, 915-927, doi:10.5194/bg-11-915-2014.
- Pansu M., Sarmiento L., Bottner P., 2009 - Micro-Organismes et Matière Organique du Sol (modèle MOMOS). Bilan de 20 ans de modélisation basée sur le traçage isotopique *in situ*. *EGS 16(2)*: 113-132.
- Pansu M., Sarmiento L., Rujano M.A., Ablan M., Acevedo D., 2010 - Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: validation of the MOMOS model. *Global Biogeochem. Cycles*. 24: GB1008. doi:10.1029/2009GB003527
- Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2012 - RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biol. Biochem.*, 52, 49-60. doi:10.1016/j.soilbio.2012.03.023
- Perveen N., Barot S., Alvarez G., Klumpp K., Martin R., Rapaport A., Herfurth D., Louault F., Fontaine S., 2014 - Priming effect and microbial diversity in ecosystem functioning and response to global change: a modeling approach using the SYMPHONY model. *Glob. chang. Biol.*, 20(4), 1174-1190. doi:10.1111/gcb.12493
- Plaza C., Gollany H.T., Baldoni G., Polo A., Ciavatta C., 2012 - Predicting long-term organic carbon dynamics in organically amended soils using the CQESTR model. *J. Soils Sediments*, 12(4), 486-493. doi:10.1007/s11368-012-0477-1
- Qi Y., Xu M., Wu J., 2002 - Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises. *Ecol. Model.*, 153:131-142. doi:10.1016/S0304-3800(01)00506-3
- Rampazzo Todorovic G., Stemmer M., Tatzber M., Katzlberger C., Spiegel H., Zehetner F., Gerzabek M.H., 2010 - Soil-carbon turnover under different crop management: Evaluation of RothC-model predictions under Pannonian climate conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173(5), 662-670. doi:10.1002/jpln.200800311
- Riggers C., Poeplau C., Don A., Bamminger C., Höper H., Dechow R., 2019 - Multi-model ensemble improved the prediction of trends in soil organic carbon stocks in German croplands. *Geoderma*, 345, 17-30. doi:10.1016/j.geoderma.2019.03.014
- Riley W.J., Maggi F., Kleber M., Torn M.S., Tang J.Y., Dwivedi D., Guerry N., 2014 - Long residence times of rapidly decomposable soil organic matter: application of a multi-phase, multi-component, and vertically resolved model (BAMS1) to soil carbon dynamics. *Geosci. Model Dev.*, 7(4), 1335-1355. doi:10.5194/gmd-7-1335-2014
- Robertson A.D., Paustian K., Ogle S., Wallenstein M.D., Lugato E., Cotrufo M.F., 2019 - Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model. *Biogeosciences*, 16(6), 1225-1248. doi:10.5194/bg-16-1225-2019
- Sainte-Marie J., Barrandon M., Saint-André L., Gelhaye E., Martin F., Derrien D., 2021 - C-STABILITY an innovative modeling framework to leverage the continuous representation of organic matter. *Nat. Commun.*, 12(1), 1-13. doi:10.1038/s41467-021-21079-6

- Segoli M., De Gryze S., Dou F., Lee J., Post W.M., Deneff K., Six J., 2013 - AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies. *Ecol. Modell.*, 263, 1-9. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.04.010
- Senapati N., Hulugalle N.R., Smith P., Wilson B.R., Yeluripati J.B., Daniel H., Ghosh S., Lockwood P., 2014 - Modelling soil organic carbon storage with RothC in irrigated Vertisols under cotton cropping systems in the sub-tropics. *Soil Tillage Res.*, 143, 38-49. doi:10.1016/j.still.2014.05.009
- Shi Z., Crowell S., Luo Y., Moore B., 2018 - Model structures amplify uncertainty in predicted soil carbon responses to climate change. *Nat. Commun.*, 9(1), 1-11. doi:10.1038/s41467-018-04526-9
- Sihi D., Gerber S., Inglett P.W., Inglett K.S., 2016 - Comparing models of microbial-substrate interactions and their response to warming. *Biogeosciences*, 13(6), 1733-1752. doi:10.5194/bg-13-1733-2016
- Sihi D., Davidson E.A., Chen M., Savage K.E., Richardson A.D., Keenan T.F., Hollinger D.Y., 2018 - Merging a mechanistic enzymatic model of soil heterotrophic respiration into an ecosystem model in two AmeriFlux sites of northeastern USA. *Agric. For. Meteorol.*, 252, 155-166. doi:10.1016/j.agrformet.2018.01.026
- Singh P., Benbi D.K., 2020 - Modeling soil organic carbon with DNDC and RothC models in different wheat-based cropping systems in north-western India. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 51(9), 1184-1203. doi:10.1080/00103624.2020.1751850
- Sistla S.A., Rastetter E.B., Schimel J.P., 2014 - Responses of a tundra system to warming using SCAMPS: a stoichiometrically coupled, acclimating microbe-plant-soil model. *Ecol. Monogr.*, 84(1), 151-170. doi:10.1890/12-2119.1
- Studdert G.A., Monterubbianesi M.G., Dominguez G.F., 2011 - Use of RothC to simulate changes of organic carbon stock in the arable layer of a Mollisol of the southeastern Pampas under continuous cropping. *Soil Tillage Res.*, 117, 191-200. doi:10.1016/j.still.2011.10.006
- Sulman B.N., Phillips R.P., Oishi A.C., Shevliakova E., Pacala S.W., 2014 - Microbe-driven turnover offsets mineral-mediated storage of soil carbon under elevated CO₂. *Nat. Clim. Chang.*, 4(12), 1099-1102. doi:10.1038/NCLIMATE2436
- Sulman B.N., Moore J.A., Abramoff R., Averill C., Kivlin S., Georgiou K., Sridhar B., Hartman M.D., Wang G., Wieder W.R., Bradford M.A., Lou Y., Mayes M.A., Morrison E., Riley W.J., Salazar A., Schimel J.P., Tang J., Classen A.T., 2018 - Multiple models and experiments underscore large uncertainty in soil carbon dynamics. *Biogeochemistry*, 141(2), 109-123. doi:10.1007/s10533-018-0509-z
- Taghizadeh-Toosi A., Christensen B.T., Hutchings N.J., Vejlin J., Kätterer T., Glendinning M., Olesen J.E., 2014 - C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecol. Modell.*, 292, 11-25. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.08.016
- Tang J., Riley W.J., 2015 - Weaker soil carbon-climate feedbacks resulting from microbial and abiotic interactions. *Nat. Clim. Chang.*, 5(1), 56-60. doi:10.1038/NCLIMATE2438
- Wang G., Post W.M., Mayes M.A., 2013 - Development of microbial-enzyme-mediated decomposition model parameters through steady-state and dynamic analyses. *Ecol. Appl.*, 23(1), 255-272. doi:10.1890/12-0681.1
- Wang G., Jagadamma S., Mayes M.A., Schadt C.W., Steinweg J.M., Gu L., Post W.M., 2015 - Microbial dormancy improves development and experimental validation of ecosystem model. *ISME J.*, 9(1), 226-237. doi:10.1038/ismej.2014.120
- Wang K., Peng C., Zhu Q., Zhou X., Wang M., Zhang K., Wang G., 2017 - Modeling global soil carbon and soil microbial carbon by integrating microbial processes into the ecosystem process model TRIPLEX-GHG. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 9. doi:10.1002/2017MS000920
- Wang D., Yao Y., Si H., Zhang W., Tang H., 2014 - Simulation and prediction of soil organic carbon spatial change in Arable Lands Based on DNDC model. *In* 2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics (pp. 1-5), IEEE. doi:10.1109/Agro-Geoinformatics.2014.6910583
- Wieder W.R., Hartman M.D., Sulman B.N., Wang Y.P., Koven C.D., Bonan G.B., 2018 - Carbon cycle confidence and uncertainty: Exploring variation among soil biogeochemical models. *Glob. Chang. Biol.*, 24(4), 1563-1579. doi:10.1111/gcb.13979
- Wieder W.R., Gordon B.B., Steven D.A., 2013 - Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nat. Clim. Chang.*, 3: 909-912. doi:10.1038/nclimate1951
- Wieder W.R., Grandy A.S., Kallenbach C.M., Bonan G.B., 2014 - Integrating microbial physiology and physio-chemical principles in soils with the Microbial-Mineral Carbon Stabilization (MIMICS) model. *Biogeosciences*, 11(14), 3899-3917. doi:10.5194/bg-11-3899-2014
- Wieder W.R., Allison S.D., Davidson E.A., Georgiou K., Hararuk O., He Y., Hopkins F., Luo Y., Smith M.J., Sulman B., Todd-Brown K., Wang Y., Xia J., Xu X., 2015 - Explicitly representing soil microbial processes in Earth system models, *Global Biogeochem. Cycles*, 29:1782-1800, doi:10.1002/2015GB005188.
- Wienhold B.J., Schmer M.R., Jin V.L., Varvel G.E., Gollany H., 2016 - CQESTR simulated changes in soil organic carbon under residue management practices in continuous corn systems. *BioEnergy Res.*, 9(1), 23-30. doi:10.1007/s12155-015-9654-6
- Woolf D., Lehmann J., 2019 - Microbial models with minimal mineral protection can explain long-term soil organic carbon persistence. *Sci. Rep.*, 9(1), 1-8. doi:10.1038/s41598-019-43026-8
- Xiao C., Guenet B., Zhou Y., Su J., Janssens I.A., 2015 - Priming of soil organic matter decomposition scales linearly with microbial biomass response to litter input in steppe vegetation. *Oikos*, 124(5), 649-657. doi:10.1111/oik.01728
- Yokozawa M., Shirato Y., Sakamoto T., Yonemura S., Nakai M., Ohkura T., 2010 - Use of the RothC model to estimate the carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56(1), 168-176. doi:10.1111/j.1747-0765.2009.00422.x
- Zhang L., Yu D., Shi X., Xu S., Xing S., Zhao Y., 2014 - Effects of Soil Data and Simulation Unit Resolution on Quantifying Changes of Soil Organic Carbon at Regional Scale with a Biogeochemical Process Model. *PLoS ONE* 9(2): e88622. doi:10.1371/journal.pone.0088622
- Zhang J., Hu K., Li K., Zheng C., Li B., 2017 - Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model. *Soil Tillage Res.*, 165, 302-314. doi:10.1016/j.still.2016.09.004
- Zhang H., Goll D.S., Manzoni S., Ciais P., Guenet B., Huang Y., 2018 - Modeling the effects of litter stoichiometry and soil mineral N availability on soil organic matter formation using CENTURY-CUE (v1.0) *Geosci. Model Dev.*, 11(12), 4779-4796. doi: 10.5194/gmd-11-4779-2018
- Zhang H., Goll D.S., Wang Y.P., Ciais P., Wieder W.R., Abramoff R., Huang Y., Guenet B., Prescher A.K., Viscarra-Rosell R.A., Barré P., Chenu C., Zhou G., Tang X., 2020 - Microbial dynamics and soil physicochemical properties explain large-scale variations in soil organic carbon. *Glob. Chang. Biol.*, 26(4), 2668-2685. doi:10.1111/gcb.14994
- Zhang Y., Lavallee J.M., Robertson A.D., Even R., Ogle S.M., Paustian K., Cotrufo M.F., 2021 - Simulating measurable ecosystem carbon and nitrogen dynamics with the mechanistically defined MEMS 2.0 model. *Biogeosciences*, 18(10), 3147-3171. doi:10.5194/bg-2020-493
- Zhao X., Hu K., Stahr K., 2013 - Simulation of SOC content and storage under different irrigation, fertilization and tillage conditions using EPIC model in the North China Plain. *Soil Tillage Res.*, 130, 128-135. doi:10.1016/j.still.2013.02.005