

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2021-2022

4/1000 un outil, pour une transition agroécologique réussie.
Une gestion durable des sols pour séquestrer le carbone et limiter le changement climatique.



**4/1000 un outil, pour une transition
agroécologique réussie.**

Une gestion durable des sols pour séquestrer le
carbone et limiter le changement climatique.

Directeur de recherche
GRELLIER Séraphine

Auteur
FOUBLE Camille

Année
2021-2022

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier Mme. Séraphine GRELLIER, tutrice de ce PFE, pour sa disponibilité, son suivi et ses précieux conseils qui ont permis l'élaboration du présent projet.

Résumé

L'initiative 4 pour 1000 est une initiative internationale visant à réduire significativement, à travers le secteur agricole, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère liée aux activités humaines. Son objectif consiste en une croissance annuelle de 4‰ des stocks de carbone dans les sols. Cela passe notamment par l'adoption et la mise en place d'actions concrètes. Pour faire les bilans de l'avancée de l'initiative, s'assurer qu'elle fonctionne et que tous les acteurs répondent à l'engagement pris, des outils de suivi sont mis en place pour connaître la quantité de carbone stockée dans les terres agricoles.

Toutefois, les modèles s'appuient en général sur un ensemble de facteurs restreints rendant les estimations incertaines. Ainsi, l'objectif de ce travail consiste en une analyse des outils d'estimation de la quantité de carbone dans les sols agricoles aujourd'hui disponibles (SIMEOS-AMG, PaSim et FSC) afin d'identifier de potentielles pistes d'amélioration de ceux-ci.

Les facteurs impliqués dans les modalités de stockage du carbone et considérés par les outils ont été analysés et comparés avec ceux déterminés dans la bibliographie. A l'issue du travail, il a été remarqué que certains facteurs sont à compléter. D'autres, en particulier biotiques, sont totalement absents. Ces manquements s'expliquent par des lacunes dans les connaissances et dans les méthodes de quantification précises de la quantité de carbone dans les sols ; mais aussi par la difficulté de retranscription mathématique des relations entre facteurs. Cela rend donc les outils propices à de fortes incertitudes. Toutefois, il faut trouver un équilibre dans la construction des outils concernant le nombre de facteurs à considérer, au risque d'amplifier les incertitudes d'estimation ou de ne pas répondre aux objectifs pour lesquels ils sont amenés à être développés. Un des enjeux repose ici : on attend d'eux qu'ils soient exigeants et efficaces pour assurer leur crédibilité, mais ils doivent pour autant rester simple d'utilisation et accessible financièrement.

Mots clés : Initiative 4 pour 1000 / sols / carbone / pratiques agricoles / cycle du carbone / modalités de stockage-déstockage de carbone / facteurs / outils d'estimation de la quantité de carbone

Sommaire

Introduction	8
I) Estimation de la quantité de carbone dans les sols des systèmes de terres arables : présentation de l’outil SIMEOS-AMG	11
A) Présentation générale de SIMEOS-AMG : interface et paramètres demandés à l'utilisateur pour les calculs	11
B) Résultats de sortie du modèle SIMEOS-AMG	12
II) Analyse du modèle SIMEOS-AMG : facteurs considérés par l’outil et piste d’amélioration	13
A) Compartimentation du carbone dans les sols et principe de calcul de sa quantité	13
B) Entrées et sorties de carbone considérées dans le modèle	14
1) Coefficients d’humification et de minéralisation	14
2) Apports de carbone hors sol et souterrain	16
A) Facteur mycorhizien	22
B) Facteur de composition chimique de la matière organique	22
C) Facteur pédofaunistique : faune et micro-organisme du sol	22
D) Facteur de culture : érosion et lessivage des sols	23
IV) Systèmes agricoles non considérés par le modèle SIMEOS-AMG	26
A) Systèmes d’espèces pérennes et de prairie permanente : analyse de l’outil PaSim 26	
1) Entrées de carbone dans les systèmes prairiaux.....	27
2) Sorties de carbone dans les systèmes prairiaux.....	28
3) Allocation de carbone par la biomasse végétale : estimation des communautés et de leur proportion dans les prairies	29
B) Systèmes forestiers : analyse de l’outil FSC	31
1) Entrées de carbone dans les systèmes forestiers	31
2) Sorties de carbone des systèmes forestiers	34
3) Allocation de carbone par les activités agricoles annexes aux activités forestières	35
C) Sous-systèmes de haies et de bocages dans les systèmes agricoles	37
Conclusion	41
Annexe	42
Bibliographie	43

Sujet

4/1000 un outil pour une transition agroécologique réussie. Une gestion durable des sols pour séquestrer le carbone et limiter le changement climatique.

Introduction

L'initiative 4 pour 1000 est une initiative internationale lancée par la COP21 en 2015 dont l'objectif est de limiter le réchauffement climatique et d'assurer la sécurité alimentaire à travers le secteur de l'agriculture. Cette initiative concerne tous types d'activités et de sols agricoles et forestiers (culture, prairie, élevage, agroforesterie...) et s'inscrit dans une volonté de transition agroécologique en favorisant la conciliation durable des pratiques agricoles avec les enjeux économiques et environnementaux actuels (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2013) (4p1000, 2018).

L'initiative vise à réduire de manière significative la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère liée aux activités humaines. Pour répondre aux objectifs climatiques exposés, le programme 4 pour 1000 demande une croissance annuelle de 0,4% des stocks de carbone dans les sols, ou 4‰ (4p1000, 2018).

L'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère est principalement due aux activités humaines (industrie, combustion d'énergie fossile...). Ces émissions sont estimées à 8,9 Gt/an. Le stock de carbone dans les deux premiers mètres de sol est estimé quant à lui à 2400 Gt (4p1000, 2018). Si nous faisons le rapport entre ces deux estimations, nous obtenons la valeur 0,4% soit 4 pour 1000. Cette valeur correspond à la quantité de carbone atmosphérique issue des activités anthropiques qu'il serait nécessaire de stocker dans les sols par an pour compenser les émissions de CO₂ anthropique dans l'atmosphère (4p1000, 2018).

La croissance attendue du stock de carbone (C) passe par l'adoption et la mise en place d'actions concrètes ayant pour but de préserver et d'augmenter ce stock dans les sols. C'est pourquoi, il est nécessaire d'accompagner tous les acteurs agricoles impliqués dans les mesures de séquestration du carbone. L'initiative propose aux parties prenantes autant d'outils et de méthodes permettant de mesurer le stock de carbone dans leurs sols.

Pour faire les bilans de l'avancée de l'initiative, s'assurer qu'elle fonctionne et que tous les acteurs répondent à l'engagement pris, des outils de suivi sont mis en place pour connaître la quantité de C stockée dans les sols agricoles et suivre son évolution (La France Agricole, s. d.). Toutefois, les prédictions des modèles d'estimation de la quantité de carbone dans les sols sont assez limitées et s'appuient en général sur un ensemble de facteurs restreints (Juliane Filser, 2016). Ainsi, l'objectif de ce travail consiste en une analyse des outils d'estimation de la quantité de carbone dans les sols agricoles aujourd'hui disponibles afin d'identifier de potentielles pistes d'amélioration de ceux-ci, mais aussi les champs de recherche qu'il reste à explorer. Cette analyse aura pour but de répondre à la problématique suivante : comment et quels facteurs doit prendre en compte un outil d'estimation de la quantité de carbone dans les sols pour concilier pertinence, efficacité, et couvrir l'ensemble des pratiques agricoles ?

Avant d'analyser les outils d'estimation et les facteurs impliqués dans les modalités de stockage/déstockage du carbone qu'ils contiennent, il est d'abord nécessaire de comprendre

ce qu'est le carbone des sols, son cycle et sa dynamique. Les recherches bibliographiques effectuées constituent la première phase de ce travail de recherche, et ont permis de comprendre les dynamiques de la matière organique (MO) et du carbone dans les sols de divers systèmes agricoles.

Dans les sols, le carbone se trouve sous la forme de C organique présent dans la MO. Cette matière provient notamment des organismes végétaux morts et vivants (biomasse aérienne et racinaire), mais aussi des déjections animales (Chenu C. et al, 2014). La MO est composée à plus de 50% de carbone organique (Pascal Boivin, 2021). Ainsi, elle constitue un réservoir temporaire de carbone dans les sols agricoles (Armelle Gac et al, 2010).

Le carbone de l'atmosphère sous forme de CO_2 est piégé dans la biomasse végétale par la photosynthèse. Lors de ce processus, les végétaux fixent l'élément carbone et rejettent le dioxygène. C'est ainsi qu'ont lieu les entrées de C dans la biomasse végétale, faisant des végétaux les principaux puits de carbone terrestre (Chenu C. et al, 2014). Le retour de ce carbone au sol se fait par l'intermédiaire du processus de décomposition (humification) de la matière organique morte, aboutissant à la production d'humus. L'humus correspond à la couche supérieure du sol créée par humification de la MO, et contient le carbone organique après humification. Une fois dans le sol, le carbone peut y résider pendant une durée plus ou moins longue selon son temps de résidence, sa position dans les horizons du sol mais aussi en fonction de l'effet de nombreux facteurs environnementaux (Armelle Gac et al, 2010).

Le déstockage de C du sol se déroule par minéralisation du carbone organique, en particulier de l'humus, qui libère du carbone minéral sous forme de CO_2 dans l'atmosphère (Chenu C. et al, 2014).

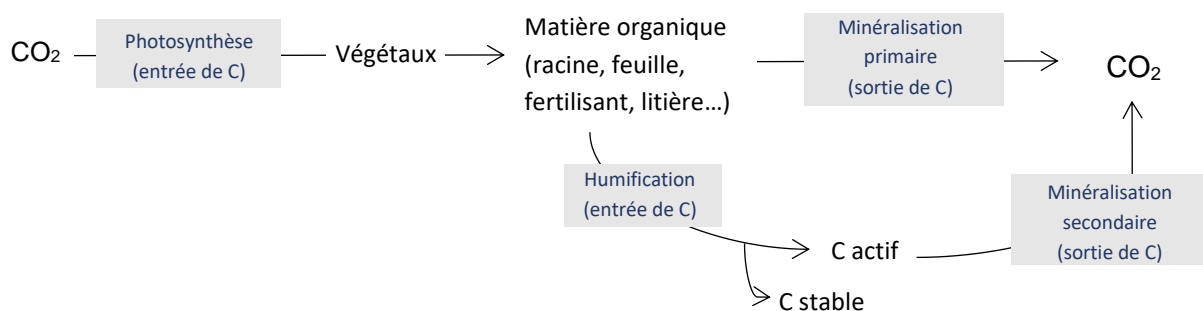


Figure 1 Dynamique simplifiée du carbone dans les sols (auteur : C.Fouble)

Par la suite, à travers la lecture d'articles scientifiques à ce sujet, les pratiques et les facteurs, c'est-à-dire les éléments climatiques, pédologiques et physico-chimiques influençant les processus d'humification de la MO, de minéralisation du carbone organique et leur résultat, ont été déterminés. Ces recherches ont donné tous les potentiels facteurs entrant dans le calcul des estimations de la quantité de carbone dans le sol et constituent une base pour savoir ce qu'un outil destiné à estimer au mieux le carbone dans les sols doit prendre en compte.

La deuxième phase du PFE a consisté ensuite à trouver des outils d'estimation de la quantité de carbone pour différents secteurs agricoles, puis analyser leur fonctionnement et les paramètres qu'ils prennent en compte. Les facteurs utilisés pour les calculs ont ensuite été comparés avec ceux déterminés dans les recherches bibliographiques, pour savoir ce que

les outils ne prennent pas en compte, et ce qu'ils devraient. Il s'agit en parallèle d'expliquer pourquoi les facteurs manquants sont nécessaires aux estimations.

Les outils sélectionnés pour analyse dans ce rapport sont SIMEOS-AMG pour les systèmes de terres arables, FSC pour les systèmes forestiers, et PaSim pour les systèmes prairiaux. Cet écrit s'appuie davantage sur le modèle SIMEOS-AMG puisqu'il est considéré comme étant l'outil le plus simple mais fiable pour l'estimation de la quantité de carbone dans les sols agricoles (Agrotransfert, s. d.). Les pistes d'amélioration seront greffées à cet outil sur la base de l'analyse des deux autres outils cités.

Les recherches effectuées dans ce travail ne concernent que les terres arables de culture, prairiales et agroforestières dans un système climatique français.

I) Estimation de la quantité de carbone dans les sols des systèmes de terres arables : présentation de l'outil SIMEOS-AMG

L'outil SIMEOS-AMG (SIMuler l'évolution de l'État Organique des Sols) est un outil de simulation de l'évolution du stock de carbone organique sous l'effet des pratiques agricoles culturales. Il a été développé en 1999 puis mis à jour par Agro-Transfert Ressources et Territoires à partir du modèle de calcul de bilan humique AMG de l'INRA (Agrotransfert, s. d.).

SIMEOS-AMG est un modèle utilisable uniquement pour les terres arables (INRAE, 2019). Cet outil permet de calculer une quantité de carbone dans un sol cultivé, mais il sert aussi de simulateur pour tester des scénarii de cultures. Grâce à cette fonction, il est possible de comparer plusieurs scénarii pour déterminer celui qui sera le plus favorable d'appliquer en lien avec le stockage de carbone dans le sol (Agrotransfert, s. d.).

L'outil est accessible en ligne et gratuitement pour sa version simplifiée.

A) Présentation générale de SIMEOS-AMG : interface et paramètres demandés à l'utilisateur pour les calculs

Les différents paramètres demandés par l'outil à l'utilisateur et pris en compte par la suite pour le calcul d'estimation sont présentés ci-dessous de manière générale.

Rotation de culture

Dans la base de données de l'outil, 60 espèces végétales de culture peuvent être sélectionnées par l'utilisateur. Pour chaque espèce, le rendement, la fréquence de restitution des résidus, le type et la profondeur de travail du sol, ainsi que l'irrigation moyenne sont demandés.

Cultures intermédiaires

Si des cultures intermédiaires sont présentes sur la parcelle, il est demandé de renseigner l'espèce, la biomasse et la fréquence à laquelle la culture est implantée.

Produits organiques

30 produits organiques sont répertoriés dans la base de données du modèle. Pour chaque produit renseigné, la dose et la fréquence d'épandage doivent être entrées.

Données de sol

15 types de sol sont présents dans la base de données. Plusieurs facteurs pédologiques sont pris en compte comme la quantité d'argile, de carbonate de calcium CaCO_3 , d'azote, le pH, le rapport $\frac{C}{N}$, la proportion de cailloux, la densité apparente ou la teneur en matière organique.

Climat

Une sélection de 38 postes climatiques est proposée. Pour chaque poste climatique, le modèle renseigne automatiquement les moyennes d'évapotranspiration (ETP), de pluie et de température annuelle.

B) Résultats de sortie du modèle SIMEOS-AMG

A la fin du calcul, le modèle SIMEOS-AMG donne les résultats de la quantité de carbone à l'équilibre dans le sol de l'exploitation (fig.2). Il fournit également, sur une projection à 30 ans, les courbes de répartition de la quantité de C et de MO selon la profondeur (fig.3), mais aussi l'évolution du stock de C et de MO sur la couche travaillée et sur une profondeur de 0-30 cm (fig. 4).

Stock à l'équilibre : 20.59 T/ha					
Année	Stock C 0-30 cm t/ha	Teneur moyenne sur Zone travaillée 0-10 cm		Teneur moyenne sur prof de prélèvement 0-30 cm	
		Teneur C g/kg	Teneur MO %	Teneur C g/kg	Teneur MO %
0	21,00	5,00	0,86	5,00	0,86
2	20,97	5,17	0,89	4,99	0,86
4	20,94	5,34	0,92	4,99	0,86
5	20,93	5,41	0,93	4,98	0,86
8	20,90	5,63	0,97	4,98	0,86
10	20,88	5,75	0,99	4,97	0,85
12	20,86	5,88	1,01	4,97	0,85
14	20,84	5,99	1,03	4,96	0,85
16	20,82	6,09	1,05	4,96	0,85
18	20,80	6,19	1,06	4,95	0,85
20	20,79	6,28	1,08	4,95	0,85
25	20,76	6,47	1,11	4,94	0,85
30	20,73	6,64	1,14	4,94	0,85
35	20,71	6,77	1,17	4,93	0,85
40	20,69	6,89	1,18	4,93	0,85
45	20,67	6,98	1,20	4,92	0,85
50	20,66	7,06	1,21	4,92	0,85
100	20,60	7,39	1,27	4,91	0,84

Flux de biomasse végétale restituée au sol :
 Biomasse aérienne moy. restituée : 0.99 T de MS/ha/an
 Biomasse racinaire moy. restituée : 0.41 T de MS/ha/an

Figure 2 Bilan des stocks de carbone calculés pour les années n (source : SIMEOS-AMG)

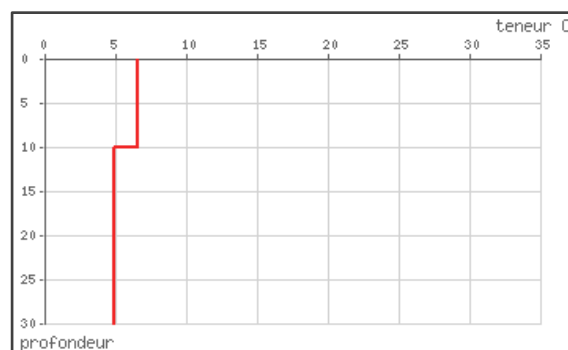


Figure 3 Répartition de la quantité de C selon la profondeur (source : SIMEOS-AMG)

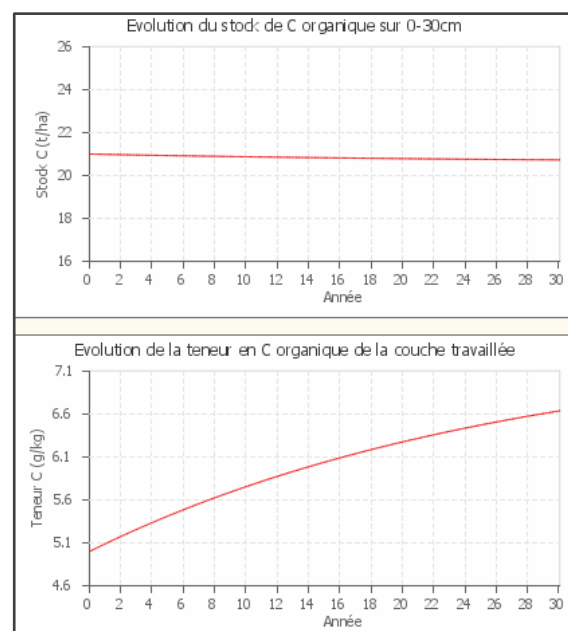


Figure 4 Evolution du stock de C sur une profondeur de 0-30 cm et sur la couche travaillée (source : SIMEOS-AMG)

II) Analyse du modèle SIMEOS-AMG : facteurs considérés par l'outil et piste d'amélioration

A) Compartimentation du carbone dans les sols et principe de calcul de sa quantité

Dans les sols, le stock de carbone est divisé en plusieurs compartiments selon les modalités de décomposition et les temps de résidence du carbone. Les temps de résidence dépendent de la composition de la matière organique et des conditions climatiques locales comme la température, le pH du sol, l'humidité... (Chenu C. et al, 2014). Le modèle SIMEOS-AMG prend en compte 3 compartiments de matière organique décrits dans le tableau ci-dessous (INRAE, 2019).

Compartiment 1	Compartiment 2	Compartiment 3
MO fraîche	MO du sol	
	Compartiment de C actif	Compartiment de C stable
Provient des résidus de culture ou des apports organiques, et peut être humifiée ou décomposée.	Correspond au C issu de l'humification de la MO fraîche. Ce C sera ensuite touché par le processus de minéralisation.	C résistant à la minéralisation pour une période > à 100 ans.

Tableau 1 Compartiments de C dans les sols, et leurs sources d'alimentation (source : Chenu C et al, 2014)

Le stock total de carbone dans le sol est partagé entre le pool de carbone actif et le pool de carbone stable, et peut être décrit mathématiquement comme suit (Hugues Clivot et al, 2019) :

$$\text{Equation 1 : } \mathbf{Qt.CTot = Qt.Cactif + Qt.Cstable}$$

En considérant le carbone actif comme étant issu des processus d'humification et de minéralisation, nous pouvons écrire que :

$$\text{Equation 2 : } \frac{dQt.Cactif}{dt} = \Sigma (mi \cdot h - Qt.Cactif \cdot k)$$

Avec mi , la quantité de matière organique qui sera humifiée selon un coefficient d'humification (h), et qui produira par la suite une quantité de C ($Qt.Cactif$) dont une partie sera minéralisée par la suite selon un coefficient de minéralisation (k).

Pour connaître la proportion du pool de carbone stable, il a été déterminé expérimentalement que $Qt.Cactif$ représente 65% de la quantité de carbone totale pour les terres arables, ou 40% sinon (Hugues Clivot et al, 2019). Ainsi, la proportion de carbone stable correspond à 35% du stock total pour les systèmes de terres arables, 60% sinon.

Toutefois, pour déterminer les proportions de carbone associées à chaque compartiment, il faut d'abord avoir connaissance de la quantité de carbone totale (Hugues Clivot et al, 2019). Pour cela, il convient d'estimer toutes les entrées et les sorties possibles de cet élément dans les systèmes, qu'elles soient aériennes ou souterraines.

B) Entrées et sorties de carbone considérées dans le modèle

Comme vu précédemment (II.A), la MO du sol est soumise aux processus d'humification et de minéralisation, modélisés par un coefficient d'humification k_1 et un coefficient de minéralisation k dans le modèle SIMEOS-AMG (Hugues Clivot et al, 2019).

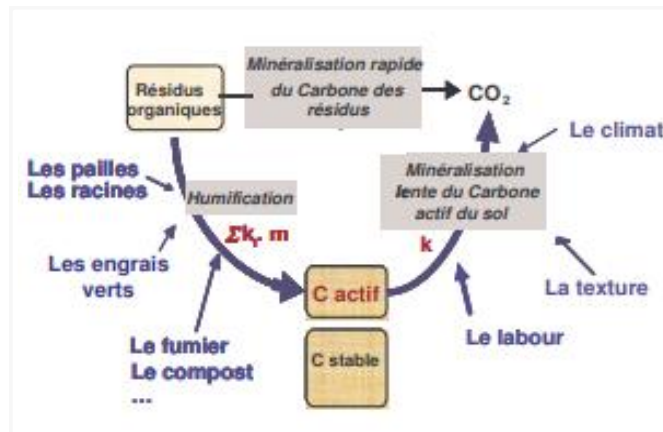


Figure 5 Cycle du carbone et bilan humique considéré par le modèle SIMEOS-AMG (source : Annie Duparque et al, 2007)

1) Coefficients d'humification et de minéralisation

Pour les calculs d'estimation de la quantité de carbone, le modèle SIMEOS-AMG s'appuie sur un bilan humique correspondant à la différence des entrées et des sorties de C organique dans le sol.

Une entrée de carbone dans le sol correspond au carbone organique issu de l'humification de la MO fraîche directement obtenue des cultures, des résidus de culture, ou d'apport de matière organique exogène (Annie Duparque et al, 2007).

Pour les entrées de carbone, le modèle prend en compte la nature, la quantité et la fréquence d'épandage des apports de MO exogène ; mais aussi la nature, la biomasse et le rendement des cultures. En fonction des rendements, le modèle déduit les biomasses des résidus (Annie Duparque et al, 2007).

Une sortie de carbone du sol correspond à la minéralisation d'une partie du carbone organique sous forme de carbone minéral (CO₂) (Annie Duparque et al, 2007).

Pour l'établissement des coefficients d'humification et de minéralisation de l'humus qui interviennent dans l'estimation des entrées et des sorties de carbone organique, le modèle SIMEOS-AMG prend en compte les différents facteurs climatiques et pédologiques suivants (Hugues Clivot et al, 2019). La justification de leur considération dans le modèle est développée ci-après.

Facteurs climatiques	Facteurs pédologiques
Température de l'air Humidité	Teneur en argile Taux de CaCO ₃ Quantité d'azote pH Rapport C/N Travail du sol Densité apparente

Tableau 2 Facteurs climatiques et pédologiques pris en compte par le modèle SIMEOS-AMG pour l'établissement des coefficients d'humification et de minéralisation (source : SIMEOS-AMG)

Température de l'air et humidité

Il a été remarqué qu'en climat chaud et humide, la minéralisation et le déstockage de carbone organique sont d'autant plus forts. Un climat et un sol plus sec sont plus favorables à l'accumulation de carbone organique (P.L. Yemadje, 2015). Toutefois, la connaissance d'une valeur seuil d'humidité favorable ou non au stockage reste à déterminer.

Teneur en argile

La teneur en argile est positivement corrélée à la teneur en carbone organique. En effet, un taux d'argile élevé permet de retenir une quantité plus importante de MO et donc de carbone par la formation de complexe argilo-humique (Vincent Freycon, 2016). Les minéraux les plus petits comme l'argile s'associent avec la MO du sol. Ils favorisent donc la stabilité et la protection du carbone organique de la minéralisation, ce qui limite alors son déstockage (Pascal Boivin, 2021).

Rapport massique C/N

Un faible rapport massique carbone sur azote ($\frac{C}{N}$) favorise l'humification (Hugues Clivot et al, 2019). La vitesse de décomposition est maximale pour un rapport massique égal à 10 (Wikipédia, 2021). En effet, pour décomposer la matière organique, les micro-organismes du sol ont besoin de carbone et d'azote pour le fonctionnement de leur métabolisme. Ainsi, un rapport C/N trop important suggère une quantité d'azote trop faible, une activité métabolique microbienne décroissante, et un ralentissement de la décomposition de la matière.

Acidité

L'acidité du sol (pH) varie en fonction de la nature des éléments minéraux présents comme le carbonate de calcium CaCO₃ (Jeremy Puissant, 2015). Le pH optimal pour l'activité des micro-organismes du sol varie entre 6 et 7 (Danielle Jacques, 2014). Un taux de CaCO₃ important acidifie le sol, altère l'activité microbienne et empêche l'humification de la MO.

Travail du sol

Le travail du sol, c'est-à-dire le labour, est également un facteur pris en compte par l'outil. Cette technique conduit à une aération importante du sol stimulant la minéralisation de la matière organique (A. Metay et al, 2009). Ainsi, elle ne favorise pas le processus d'humification ni le stockage de carbone organique dans le sol.

Densité apparente et structure du sol

La structure d'un sol correspond à la manière dont les particules le constituant s'assemblent. Les communautés microbiennes vivent dans le réseau de pores du sol et sont responsables de la décomposition de la matière organique. Ainsi, l'accès des microorganismes à la MO

dépend de la manière dont le réseau est structuré (Sabrina Juarez et al, 2013). Dès lors, la structure joue sur la vitesse de minéralisation et donc sur la capacité des sols à stocker ou non le carbone. L'étude menée par Sabrina Juarez et al. (2013) a montré que dans un sol présentant des pores d'un diamètre inférieur à 13 μm , les microorganismes n'ont plus la capacité de circuler dans le réseau pour accéder à la MO à décomposer. Un diamètre des pores de cette valeur correspond à un sol très compacté avec une porosité inférieure à 0,19 (la valeur de porosité est comprise entre 0 et 1). Pour indication, une valeur de porosité égale à 0,19 est associée à un sol dont la majorité des pores ont un diamètre de 250 μm (Yongwei Fu et al, 2019).

Toutefois, les pratiques agricoles modernes, avec l'utilisation de machinerie lourde, sont connues pour compacter les sols et diminuer fortement leur porosité. Après un travail du sol, un seul passage de poids lourd peut faire diminuer sa porosité de l'ordre de 59 à 89% (Yongwei Fu et al, 2019). Le compactage change la structure du sol en réduisant le volume des pores. Ainsi, la circulation possible de l'air et des microorganismes dans ceux-ci devient difficile, ce qui impact fortement la dynamique de la MO et la stabilisation du C organique dans le sol. Le compactage du sol est donc bien un facteur à prendre en compte car il peut jouer fortement sur la capacité du sol à stocker du C.

2) Apports de carbone hors sol et souterrain

Le calcul des apports de carbone hors sol et souterrain s'appuie sur des valeurs d'allocation de C par les différentes parties végétales (Hugues Clivot et al, 2019). Les valeurs d'allocation permettent ainsi d'estimer les apports souterrains issus des racines, et les apports hors sol correspondant dans le cas des cultures aux apports de matière organique exogène et aux résidus de culture laissés sur place (Hugues Clivot et al, 2019).

a) Allocation souterraine par les systèmes racinaires

L'allocation de C par les racines reposent sur 2 apports : le carbone issu des racines après la mort racinaire, et le C issu des matières extra racinaires (exsudats) (Hugues Clivot et al, 2019).

Les apports par les racines contribuent très largement aux entrées de matière organique et de carbone dans les sols. Cette contribution dépend notamment des espèces végétales présentes sur la parcelle (D.Derrien et al, 2016). En effet, la quantité de carbone stockée par les racines dépend notamment de son type (racine ligneuse ou herbacée). Ainsi, le stock de carbone racinaire diffère selon les espèces et ne peut pas être réduit à une valeur unique applicable à tous les végétaux (D.Derrien et al, 2016).

Dans le modèle SIMEOS-AMG, la quantité de C présente dans les racines pour les différentes cultures a été calculée à l'aide des biomasses racinaires données par les rapports tige/racine définis par Bolinder et al (2007). Ces rapports permettent de connaître la proportion de racine dans le sol pour chaque espèce. Un résumé des rapports par espèce de culture est présenté dans le tableau ci-dessous.

Espèce cultivée	Rapport tige/racine (shoot to root ratio)
Blé de printemps	7 +/- 2.2
Blé d'hiver	6 +/- 1.2
Orge	10,7 +/- 3.1
Avoine	2,5 +/- 0.2
Maïs	5,6 +/- 2.8
Soja	5.2 +/- 3.1

Tableau 3 Rapport tige/racine pour différentes espèces cultivées (source : Bolinder et al. 2007)

Avec les travaux de Bolinder et al. sur ces rapports, il a été vu que la proportion du système racinaire était propre à chaque espèce de culture. Toutefois, nous pouvons aussi penser que la proportion racinaire diffère au sein même d'une espèce, d'un individu à l'autre, selon son âge, sa taille ou encore les conditions de sa culture. Cependant, la variabilité racinaire entre les individus de la même espèce n'a pas été prise en compte dans le modèle SIMEOS-AMG (Hugues Clivot et al, 2019). En effet, après utilisation d'équation allométrique dans le modèle, il a été remarqué qu'il y avait peu de différence d'estimation du stock de C dans les racines en utilisant ces équations ou en prenant une valeur fixe de quantité de C racinaire par espèce appliquée à tous les individus (Hugues Clivot et al, 2019). Ainsi, le modèle a fait le choix de n'utiliser qu'une seule valeur de biomasse racinaire par espèce, en ne se basant pas sur le fait qu'au sein d'une même espèce, plusieurs individus peuvent présenter des variations de biomasse racinaire. Ceci est d'autant plus vrai dans les systèmes de culture, puisque tous les individus de la parcelle ont le même âge, et sont cultivés dans les mêmes conditions.

Une fois que l'on a une idée de la proportion de racine grâce au ratio précédemment expliqué, l'estimation de la quantité de carbone est calculée en supposant une teneur de 0,40g de C par gramme de matériel racinaire. Cette valeur est une valeur de référence obtenue par des expérimentations françaises dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Jean Boiffin et al, 1986).

Espèce cultivée	Teneurs en carbone de référence dans les racines (g.C / g.matériel racinaire)
Céréale	0,40
Maïs	0,40
Betterave sucrière	0,40
Pomme de terre	0,40
Colza	0,40
Pois, haricot	0,40
Luzerne	0,40

Tableau 4 Teneurs en carbone racinaires pour quelques espèces cultivées (source : Jean Boiffin, 1986)

Avec les valeurs de référence de Jean Boiffin (1986), nous avons une idée de la quantité de C stockée dans les racines vivantes. Toutefois, quand les racines meurent, la

quantité allouée au sol après décomposition est différente (Claire Marsden, s. d.). En effet, une fois que la matière vivante meurt, celle-ci est dégradée par la faune du sol. Lors du catabolisme de la MO par ces organismes, une partie du C présent dans celle-ci est utilisée pour le fonctionnement de leur métabolisme et est rejetée sous forme de CO₂ (Claire Marsden, s. d.). Ce carbone minéral ne contribue plus au stock de carbone dans le sol. Le modèle SIMEOS-AMG ne prend pas en compte ce phénomène comme paramètre de sortie de carbone du système. Ainsi, pour estimer l'allocation réelle au sol de C par les racines, il faut connaître, pour une quantité x de matériel racinaire, la proportion de carbone qui sera directement minéralisée par les organismes.

Le modèle prend en compte dans les coefficients d'humification et de minéralisation les facteurs de T° de l'air, d'humidité du sol, de taux d'argile et de CaCO₃, de pH, de rapport $\frac{C}{N}$ (voir II.B.1), mais ne prend pas en compte la composition chimique de la MO à humifier et à minéraliser. Pourtant, la décomposition de la matière racinaire dépend aussi de sa chimie comme le taux de lignine ou de cellulose (J. Moreno-Cornejo et al, 2014). En effet, une forte teneur en lignine rend le matériel racinaire plus difficilement décomposable (D.Derrien et al, 2016). Chaque espèce végétale produit une MO racinaire de composition lignique différente. Par exemple, le maïs contient 212 mg de lignine par gramme de matériel racinaire contre 134 pour le blé (Samuel Abiven et al, 2011). De ce fait, les taux de décomposition de biomasse racinaire diffèrent d'une espèce à l'autre. Par conséquent, le taux de lignine fait différer entre les espèces la quantité de C allouée au sol par les racines à un instant t de calcul. Théoriquement, si l'on prend une espèce A avec un taux de lignine racinaire deux fois plus important que l'espèce B, la durée de décomposition pour un même volume de matériel racinaire sera plus longue pour l'espèce A que pour l'espèce B. Ainsi, à un instant t de calcul, la quantité de carbone allouée par le matériel de l'espèce A sera moindre par rapport à B.

Ainsi, la consommation de C par décomposition faunistique et la composition chimique du matériel racinaire, doivent être prises en compte dans les coefficients d'humification et de minéralisation du modèle.

Allocation de carbone par les matières extra racinaires

Le C issu du tissu des racines n'est pas la seule contribution racinaire. Les matières extra racinaires correspondent aux exsudats, aux poils absorbants et aux fragments de racines décollés pendant la croissance du végétal (M.A. Bolinder et al, 2007).

La quantité de carbone issue des matières extra racinaires est estimée dans le modèle à partir des hypothèses de Bolinder et al (2007). Toutefois, il existe encore des incertitudes concernant l'estimation de la quantité de C allouée par cette composante. Cependant, des études ont estimé que le carbone issu de matériel extra racinaire représentait 65% du carbone présent dans les racines (M.A. Bolinder et al, 2007). C'est cette valeur qui a été retenue par le modèle SIMEOS-AMG.

Pour déterminer l'allocation réelle de C par ces matériaux, il s'agira également de considérer la consommation de C par le métabolisme de la faune lors du processus de décomposition, et leur composition chimique (voir précédemment).

b) Allocation hors sol issu des résidus de culture

L'allocation de C issu des résidus de culture est calculée dans le modèle en tenant compte d'un indice de récolte moyenne et de la fréquence de restitution des résidus. Pour les plantes de culture produisant des graines, le modèle prend également compte d'un rapport grain/biomasse inclus dans l'estimation de l'indice de récolte.

Les valeurs d'indice de récolte utilisées par SIMEOS-AMG sont issues d'une étude de Donald C.M (1962). L'indice de récolte est donné par rapport à la proportion totale de la biomasse produite hors sol, et correspond à la proportion de végétal cultivé qui ne sera pas restituée au sol. Les indices de récolte utilisés par le modèle pour certaines espèces sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Espèce cultivée	Indice de récolte (en %)
Blé	40
Orge	53
Avoine	53
Mais	50
Soja	40

Tableau 5 Indices de récolte pour quelques espèces cultivées (source : Bolinder et al. issu de Donald.C.M 1962)

Ainsi, la différence entre la proportion totale de biomasse produite hors sol et la proportion de biomasse récoltée donnée par l'indice de récolte, donne la proportion résiduelle de végétal. Cette proportion pourra contribuer à une entrée de C si elle est laissée sur place.

Concernant les valeurs de quantité de carbone présente dans les parties aériennes pour chaque espèce, la description de l'outil ne donne pas de détails sur les données utilisées. Sachant que l'outil SIMEOS-AMG utilise les données de référence issues de Boiffin (1986) pour l'allocation de C dans les racines (voir II.B.2.a), nous pouvons supposer qu'il utilise ces mêmes valeurs concernant l'allocation de carbone par les parties aériennes. Des exemples d'allocation de C aérien sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Espèce cultivée	Teneurs en carbone de référence dans les parties aériennes (g.C / g.matériel aérien)
Céréale	0,45
Maïs	0,44
Betterave sucrière	0,35
Pomme de terre	/
Colza	0,44
Pois, haricot	0,44
Luzerne	0,44

Tableau 6 Teneurs en carbone racinaires pour quelques espèces cultivées (source : Jean Boiffin, 1986)

Nous avons une idée de la quantité de carbone dans les parties aériennes des végétaux vivants. Toutefois, tout comme pour la biomasse racinaire, une fois le résidu laissé au sol, le modèle ne tient pas compte de la perte de C à l'issue du catabolisme par la pédofaune. Ainsi, pour estimer l'allocation réelle au sol de C par les résidus de culture, il faut connaître, pour une quantité x de matière fraîche résiduelle, la proportion de carbone qui sera directement minéralisée par les organismes.

Dans les coefficients d'humification et de minéralisation, le modèle prend en compte un certain nombre de paramètres biotique et abiotique (voir II.B.1). Toutefois, tout comme pour les racines, la décomposition de la biomasse aérienne dépend aussi de sa composition chimique notamment des taux de lignine et de cellulose (J. Moreno-Cornejo et al, 2014). En effet, une forte teneur en lignine et en cellulose ralentit les processus de dégradation (Claire Marsden, s. d.).

Chaque espèce végétale produit une MO de composition lignique et cellulosaire différente. Par exemple, le maïs comporte 161 mg de lignine par gramme de matériel aérien, contre 104 mg pour le blé (Samuel Abiven et al, 2011). De ce fait, les taux de décomposition de biomasse aérienne, et par conséquent la quantité de C allouée par les résidus à un instant t de calcul, diffèrent d'une espèce à l'autre et cela doit être pris en compte par le modèle.

Ainsi, tout comme pour les racines, la consommation de C par décomposition faunistique et la composition chimique du matériel aérien, doivent être prises en compte dans les coefficients d'humification et de minéralisation du modèle.

c) Allocation hors sol issu d'apports organique exogène et effets de ces apports sur la biomasse des cultures

Le modèle SIMEOS-AMG prend en compte plusieurs types de produits et de fertilisants organiques. Pour chaque produit, les valeurs d'allocation de C sont calculées en fonction de la quantité appliquée renseignée au préalable dans l'interface, de leur teneur en carbone et d'un coefficient d'humification propre à chacun (Hugues Clivot et al, 2019). Les produits et leurs facteurs associés sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 7 Teneur en C et coefficient d'humification associés aux produits organiques de la base de données de SIMEOS-AMG (source : Manuel SIMEOS-AMG, version 2019)

Groupe	Produit Résiduaire Organique (t/ha)	Teneur en C (mg/kg MB)	K1
Boues	Boue urbaine liquide	12	0,47
	Boue déshydratée non chaulée	49	0,47
	Boue déshydratée chaulée	63	0,47
	Boue traitement lisier porc	18	0,47
	Boue papeterie	70	0,61
Digestats	Digestat brut	35	0,63
	Digestat liquide	15	0,63
	Digestat solide	100	0,63
	Digestat voie sèche	100	0,63
Effluents d'élevage	Fumier bovin	80	0,67
	Fumier ovin	120	0,67
	Fumier porc	145	0,61
	Fumier de Cheval	135	0,49
	Fumier volailles	223	0,46
	Fiente de Canard	211	0,16
	Fiente de Dinde	211	0,16
	Fiente de Poule brute	85	0,16
	Fiente de Poule sèche	216	0,41
	Lisier de Bovin	30	0,46
	Lisier de Porc	21	0,51
Compost	Compost de déchets verts	121	0,82
	Co-compost de déchets verts et biodéchets	183	0,77
	Co-compost de déchets verts et boue	124	0,8
	Compost d'ordures ménagères résiduelles	111	0,53
	Compost de fumier (sauf volaille)	123	0,72
	Refus lisier de porc +/- composté	139	0,63
	Compost de fumier de volailles	110	0,46
Autres	Ecumes défécation	32	0,1
	Vinasse diluée	22	0,55
	Vinasse concentrée	248	0,55

Concernant les effets des apports sur la croissance végétale, leur application joue sur la biomasse aérienne uniquement. En effet, des études ont montré que la fertilisation NPK a davantage d'effet sur la croissance des parties aériennes, mais en revanche très peu sur la biomasse racinaire (Martin Komanda et al, 2018). Il a été estimé qu'une fertilisation de ce type augmente par un facteur 2 la masse de matière sèche aérienne (Laetitia Hacker, 2017).

La description d'Hugues Clivot et al (2019) ne donne pas de détails sur comment l'outil prend en compte les fertilisants dans la croissance des parties aériennes. Étant donné que SIMEOS-AMG concerne uniquement les plantes de culture et que celles-ci sont destinées à être récoltées, les parties aériennes ne sont donc pas considérées comme parties prenantes du stock de carbone, sauf dans le cas où les résidus de culture sont restitués au sol. Même dans ce cas, aucun facteur de croissance n'est considéré par le modèle. Ainsi, la fertilisation organique est considérée par l'outil uniquement comme apport de carbone supplémentaire au sol, mais non pas comme un facteur potentiel de croissance de biomasse aérienne qui pourra par la suite augmenter la contribution de carbone des résidus de culture. Pourtant, au vu de l'effet des fertilisants sur les parties aériennes (facteur 2 d'augmentation de matière sèche), il serait intéressant de considérer la contribution des fertilisants dans l'allocation de C par les résidus de culture fertilisée. Ainsi, il faudrait dissocier dans l'estimation des entrées de C, les apports des résidus de culture fertilisée et ceux de culture non fertilisée, qui ne contiennent donc pas la même quantité de carbone du fait d'un différentiel de biomasse.

Cette première partie illustre des pistes d'amélioration pour les facteurs initialement existants dans l'outil SIMEOS-AMG afin d'affiner les estimations de la quantité de carbone des sols

arables. Toutefois, d'autres facteurs intervenant dans la dynamique du carbone des sols et influant sur les estimations sont absents du modèle.

III) Facteurs non pris en compte par l'outil SIMEOS-AMG pour l'estimation de carbone

A) Facteur mycorhizien

Au niveau des racines, les plantes peuvent s'associer avec des bactéries et des champignons pour former des mycorhizes. Les mycorhizes influencent le devenir du matériel racinaire. En effet, une racine qui ne présente pas cette association est plus facilement et rapidement décomposée par la faune du sol, ce qui fait chuter les stocks de carbone (D.Derrien et al, 2016).

Les plantes représentent la principale source de carbone organique dans le sol à travers les biomasses aérienne et racinaire, mais aussi via les associations mycorhiziennes au niveau des racines (D.Derrien et al, 2016). Le modèle SIMEOS-AMG s'affranchit de la présence ou non de mycorhizes sur les racines. Toutefois, il a été montré que les racines d'une espèce de pin colonisées par des champignons mycorhiziens ne perdaient que 7% de leur quantité de carbone par rapport aux racines de la même espèce mais non mycorhizées, qui elles en perdent 19% après 2 ans de décomposition (J.A. Langley et al, 2006). Cette différence de perte n'est pas négligeable. Ainsi, le facteur mycorhizien se doit d'être considéré dans les estimations.

Toutefois, la difficulté d'intégration de ce facteur dans les modèles repose avant tout sur la complexité d'estimation de la biomasse mycorhizienne et de quantification de son effet sur la décomposition selon les espèces végétales. Cela représente une potentielle piste de recherche pour l'amélioration des connaissances à ce sujet et par la suite des outils d'estimation du carbone des sols.

B) Facteur de composition chimique de la matière organique

Comme vu précédemment, les teneurs en lignine et en cellulose du matériel végétal représentent des contraintes pour la décomposition et créent des différences d'allocation de C entre les espèces à un instant t de calcul (voir II.B.2.a et b. pour le détail). Le facteur de composition chimique de la matière est donc nécessaire à prendre en compte dans un outil d'estimation.

Il en est de même pour la teneur en azote des apports de matière exogène qui influencent le stock et la dynamique du carbone organique dans le sol (voir II.B.1 et II.B.2.c pour le détail).

C) Facteur pédofaunistique : faune et micro-organisme du sol

Deux principaux facteurs sont impliqués dans les modalités de stockage et de déstockage du carbone : les facteurs abiotiques, traités par le modèle SIMEOS-AMG, et les facteurs biotiques incluant les micro-organismes, les champignons et les bactéries (D.Derrien et al, 2016).

Dans ses calculs, le modèle ne considère aucun facteur biotique lié aux organismes du sol. Pourtant, la pédofaune peut influencer plus ou moins intensément l'humification et la minéralisation des débris végétaux (Georges Bachelier, 1974).

La pédofaune accroît fortement l'activité microbiologique du sol et donc par conséquent les réactions impliquant la MO (Georges Bachelier, 1974). En soit, la contribution de la faune du sol au processus de dégradation de la MO est faible et estimée à $\frac{1}{10}$ de la contribution des microorganismes (Georges Wauthy, 1982). Mais, il a été montré qu'elle pouvait accélérer de 5 fois environ la dégradation de la MO par les microorganismes (Georges Bachelier, 1974).

La faune est capable de dégrader par broyage et déchiquetage la matière non ligneuse, ce qui permet d'augmenter les surfaces d'interaction entre les microorganismes et les fragments végétaux (Georges Wauthy, 1982). Les composés végétaux consommés par la faune passent par leur tube digestif. A cet effet, la matière organique non ligneuse est chimiquement dégradée, déstabilisée et enrichie en enzyme (L.Amdouni-Boursier et R.Goffaux, 2019). Les enzymes permettent la décomposition des molécules organiques en molécules de plus petite taille assimilables par les communautés microbiennes (Jeremy Puissant, 2015). Cette nouvelle composition facilite pour les microorganismes du sol la dégradation de la matière rejetée par la faune (Georges Bachelier, 1974). D'autres substances secrétées par la faune, comme le glucose ou le mucus de vers de terre, sont également capables de stimuler l'activité microbienne (P.Lavelle et C.Gilot, 1994). La nature des substances et des enzymes secrétées dans la matière rejetée dépend de l'animal par laquelle celle-ci est passée (P.Lavelle et C.Gilot, 1994). Ainsi, par rapport au degré de stimulation microbienne que ces substances provoquent, les taux et les durées de décomposition de la matière organique, et par conséquent la quantité de carbone calculée à un instant t, diffèrent selon la composition et la richesse faunistique du sol.

Ainsi, la faune et les microorganismes du sol jouent un rôle majeur dans les stocks et la dynamique du carbone et sont donc à considérer dans les outils d'estimation de la quantité de carbone.

Comme vu, il existe un véritable lien entre la faune, les microorganismes et la quantité de carbone organique. Il est donc primordial d'avoir une idée générale de la proportion et de la composition de la faune du sol pour préciser l'estimation. En ne considérant pas le facteur faunistique dans les processus impliquant le carbone, les prédictions de l'outil sont entravées. Toutefois, l'intégration de cette composante dans un modèle n'est pas aisée. Son absence dans les estimations peut s'expliquer par le manque de connaissance au sujet de la faune et de la microfaune, quant à sa quantification dans les sols et ses modalités précises et quantifiées de fonctionnement (Juliane Filser, 2016). La quantification des communautés faunistiques est d'autant plus compliquée à intégrer dans un outil, puisqu'il existe autant de communautés que de parcelles agricoles. Quant à la quantification de leur fonctionnement, quelques connaissances ont été développées à ce sujet. Par exemple, des études ont estimé que l'ensemble des interactions faune-microorganisme-MO aboutissent à la minéralisation d'environ 60% du carbone organique, mais le sujet reste à développer (Jeremy Puissant, 2015).

D) Facteur de culture : érosion et lessivage des sols

Le modèle SIMEOS-AMG ne considère pas les pertes de sol et de carbone par lessivage.

Le lessivage correspond à l'entraînement par l'eau d'éléments de sol (Actu Environnement, s. d.). Pourtant, ce phénomène est d'autant plus présent dans les systèmes de terres arables puisque le sol est souvent à nu. Dans le cas des terres cultivées, sans culture intermédiaire ni couvert permanent, le lessivage est l'un des principaux processus de perte de carbone dans les sols avec la minéralisation de la MO (Food and Agriculture Organization, s. d.). En effet, le travail du sol favorise le ruissellement des eaux de surface et l'érosion, entraînant la matière organique présente en surface du sol (E. Blanchart et al, 2004). Cette matière sortante du système représente donc par conséquent une perte de carbone qui aurait pu potentiellement alimenter le stock dans le sol.

Pour pouvoir calculer cette perte, il est nécessaire de connaître le volume de sol érodé, et d'estimer la quantité de carbone inclus dans ce volume. Cette estimation pourra être retranchée par la suite à l'estimation de carbone totale faite à l'échelle du système.

La figure suivante (fig.6) résume graphiquement les facteurs et leurs relations à considérer dans les systèmes de terres arables.

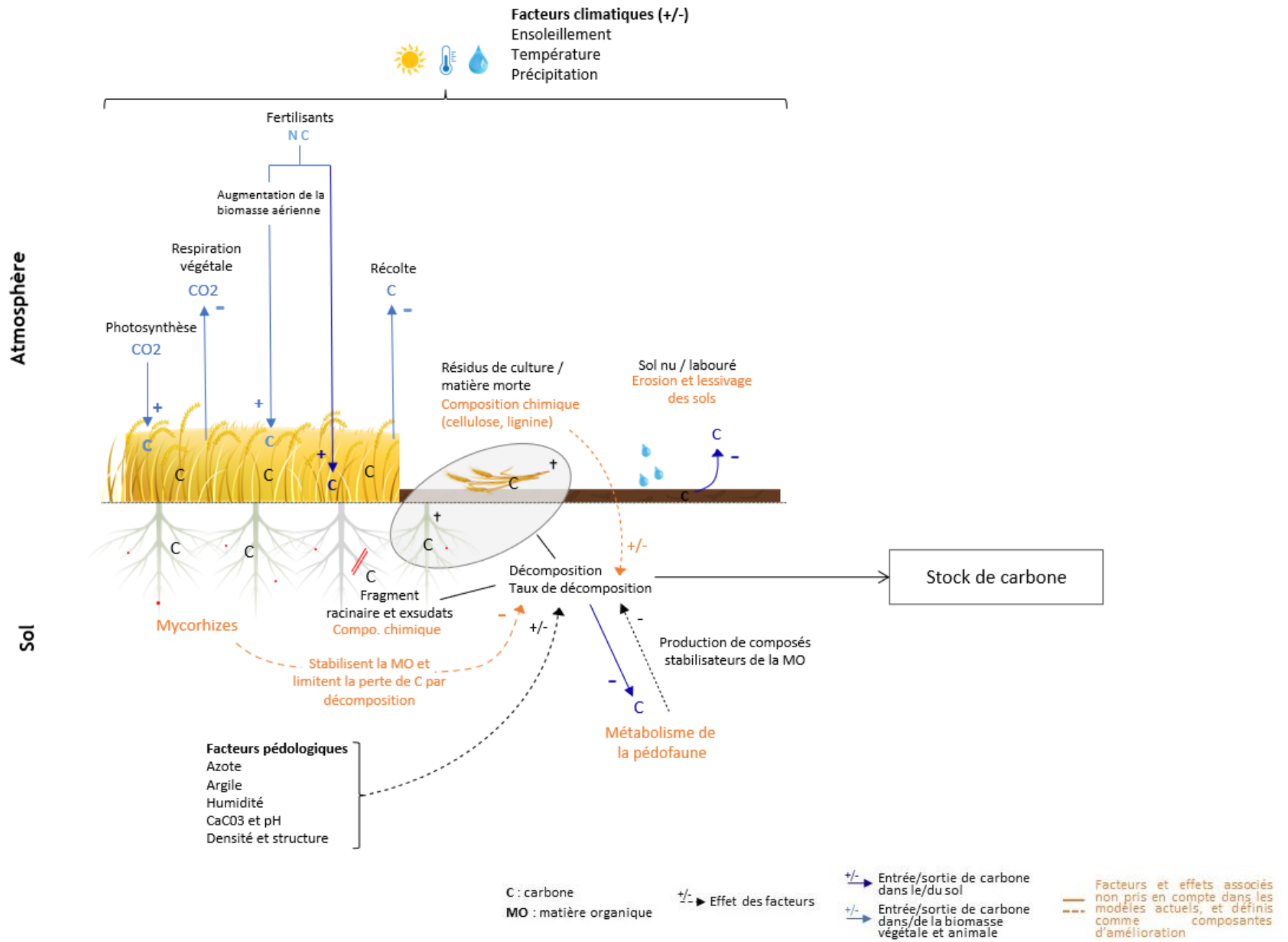


Figure 6 Résumé des facteurs et de leurs relations à considérer dans les modèles pour les systèmes de terres arables (source : C.FOUBLE)

Le modèle SIMEOS-AMG traite uniquement les systèmes de terres arables et les facteurs associés. Toutefois, l'initiative 4 pour 1000 concerne tous types d'activités et de sols agricoles, comprenant aussi les activités forestières et prairiales.

IV) Systèmes agricoles non considérés par le modèle SIMEOS-AMG

Des études menées en lien avec la détermination des sources et des puits de carbone ont montré que les principaux puits terrestres correspondaient aux prairies et aux forêts (4p1000, 2018). Les stocks de carbone dans ces systèmes sont bien plus importants que dans ceux de terres arables. Les prairies peuvent stocker jusqu'à 70 tC/ha et les forêts entre 150 et 400 tC/ha sur les 30 premiers centimètres de sol, alors que les terres arables en comptent 43 tC/ha (Armelle Gac et al, 2010). Ces stocks plus importants s'expliquent notamment par la présence d'un couvert permanent présentant plus de surface racinaire et foliaire.

Ainsi, un outil inhérent à l'initiative 4 pour 1000 qui se veut complet pour l'estimation de la quantité de carbone dans les sols agricoles se doit de prendre en compte ces systèmes. L'analyse des outils PaSim pour les systèmes prairiaux, et FSC pour les systèmes forestiers constitueront des pistes d'amélioration pour le modèle SIMEOS-AMG.

A) Systèmes d'espèces pérennes et de prairie permanente : analyse de l'outil PaSim

Le modèle PaSim (Pasture Simulation model) développé par Riedo et al (1998), est un outil d'estimation de la quantité de carbone pour les écosystèmes de prairies permanentes composées de graminées et de légumineuses (INRA, 2018). Cet outil ne considère que les systèmes herbagers (A.-I. Graux et al, 2013).

Les figures suivantes résument les facteurs pris en compte par l'outil PaSim pour l'estimation de la quantité de carbone dans les sols de prairies. L'analyse des différents facteurs est détaillée ci-après.

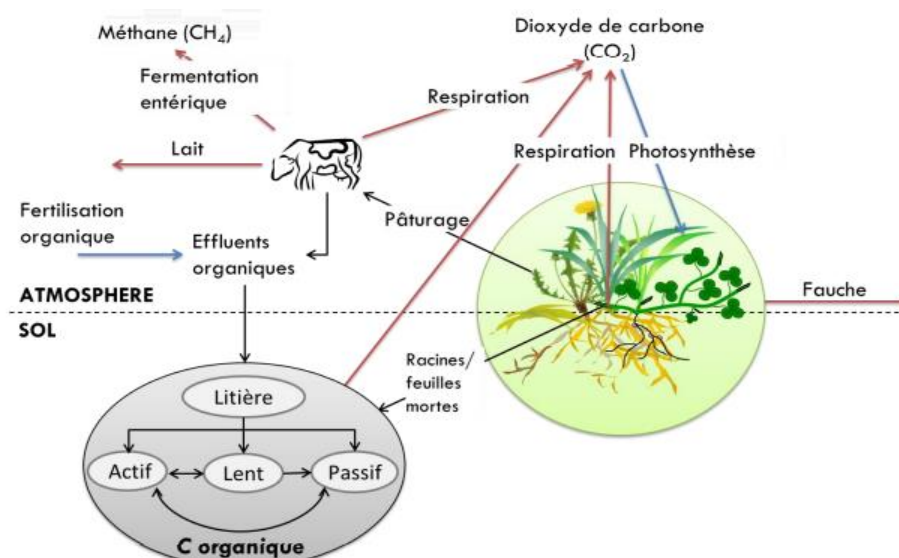


Figure 7 Facteurs et relations considérés dans le modèle PaSim (source : INRA, 2018)

Facteur climatique	Facteur pédologique	Facteur de végétation	Facteur animal	Facteur de gestion
Ensoleillement Précipitation Température CO ₂ CH ₄	Texture (argile, limon, sable) Humidité pH Densité apparente Teneur en azote	Respiration Photosynthèse Espèce Biomasse Présence ou non de légumineuse Fraction de lignine	Type d'herbivore Densité de peuplement animal Age des individus Intensité du pâturage Métabolisme Fertilisation	Fauche Pâturage Labour Fertilisation

Tableau 8 Résumé des facteurs pris en compte par le modèle PaSim (source : R.Lardy et R.Martin, 2011)

1) Entrées de carbone dans les systèmes prairiaux

Les entrées de carbone dans les systèmes prairiaux sont en majorité apportées par les biomasses végétales aérienne et racinaire des espèces présentes dans le système (voir II. pour les allocations) (Armelle Gac et al, 2010).

Concernant ces entrées, les paramètres les plus déterminants du stock correspondent à la quantité de carbone inclus dans les éléments végétaux, vivants et morts, et dans la matière organique du sol ; ce qui est déjà bien considéré par SIMEOS-AMG (Armelle Gac et al, 2010).

Entrées de carbone dans la biomasse végétale par photosynthèse

Le carbone est stocké dans les végétaux par fixation du CO₂ atmosphérique lors du processus de photosynthèse. Dans le modèle PaSim, les entrées de carbone dans la plante sont contrôlées par plusieurs facteurs environnementaux comme le facteur de stress hydrique, ce que ne considère pas le modèle destiné aux cultures (A.-I. Graux et al, 2013). En effet, un déficit en eau limite la photosynthèse, donc la fixation de carbone par la plante, et par conséquent les stocks inclus dans la biomasse végétale (A.-I. Graux et al, 2013).

Entrées de carbone par décomposition des litières

Plusieurs paramètres sont considérés par PaSim comme agissant sur la décomposition des litières (humification et minéralisation). Tout d'abord, des paramètres communs avec le modèle SIMEOS-AMG sont inclus dans le calcul comme la température de l'air et du sol, la texture, la structure et l'humidité du sol, le rapport $\frac{C}{N}$, le pH... (M. Riedo et al, 1998). Toutefois, à l'inverse de l'outil destiné aux terres arables, PaSim considère le taux de lignine et d'azote présents dans les plantes et dans le sol.

Les litières ne sont pas considérées de la même manière dans les systèmes de cultures et de prairies. Dans le cas de SIMEOS-AMG, si les résidus de culture ne sont pas restitués au sol, l'allocation de carbone issu de la litière n'est pas prise en compte dans l'estimation. PaSim considère quant à lui les entrées de carbone issu de la litière par décomposition des résidus végétaux morts et non ingérés dans le cas des prairies pâturées.

Entrées de carbone par fertilisation minérale et organique

De la même manière que SIMEOS-AMG, l'outil destiné aux systèmes prairiaux prend en compte les apports de fertilisants minéraux et organiques (A.-I. Graux et al, 2013).

Dans le cas des prairies pâturées, PaSim considère l'apport de C par les déjections animales (Armelle Gac et al, 2010). En effet, le carbone de la biomasse végétale prélevée par les animaux n'est pas considéré comme définitivement perdu. Une proportion de carbone ingérée est restituée sous forme de déjection. De plus, l'apport de nourriture complémentaire aux animaux comme le grain, représente également une entrée de carbone par les déjections (Elisabeth Jérôme et al, 2012). En effet, il ne s'agit pas directement du carbone initialement présent dans la biomasse végétale du système.

Les apports de matière organique exogène, s'ils existent, doivent être considérés de la même manière que pour les systèmes de cultures, c'est-à-dire sur leur apport de carbone, d'azote et sur la croissance de la biomasse aérienne qu'ils génèrent (voir II.B.2.c) (Elisabeth Jérôme et al, 2012). L'augmentation de biomasse aérienne par les fertilisants a d'autant plus de considération dans les systèmes de couverture permanente que dans les systèmes de terres arables.

A l'inverse du modèle SIMEOS-AMG, PaSim tient compte de la quantité d'azote apportée par les fertilisants et les déjections animales. Il considère ainsi les entrées d'azote dans le système comme générateur de croissance végétale, en parallèle de l'application d'un taux de croissance fonction de la quantité d'azote épanchée puis prélevée par le végétal. Un coefficient de minéralisation de l'azote permet de donner une proportion d'azote minéral dans le sol, qui par la suite sera absorbé et utilisé par les espèces pour leur croissance (A.-I. Graux et al, 2013).

2) Sorties de carbone dans les systèmes prairiaux

Sorties de carbone par travail du sol et pâturage

PaSim prend en compte les facteurs de retournement de sol et d'exploitation de l'herbe par fauche et pâturage (A.-I. Graux et al, 2013).

Concernant les activités culturales, dans le cas des prairies fauchées, des pertes de carbone ont lieu par fauchage selon une fréquence et une intensité de fauche (Armelle Gac et al, 2010). Si les produits de fauche sont exportés (foin...), les pertes sont à prendre en compte de la même façon que pour les terres arables (voir II.B.2).

Dans le cas des prairies pâturées, PaSim considère comme perte le volume de biomasse aérienne prélevée par les herbivores (A.-I. Graux et al, 2013). En effet, il est nécessaire de connaître la proportion de végétal prélevée par individu pour l'extrapoler ensuite à l'ensemble de la parcelle par rapport au nombre total d'individu présent. Cela permet de connaître l'intensité de pâturage et la quantité de biomasse végétale ingérée. Toutefois, lorsqu'une portion de végétal est consommée, celle-ci est capable de repousser et de constituer une nouvelle portion du stock de carbone selon un facteur de croissance (Armelle Gac et al, 2010). Initialement, un végétal comporte une quantité X de carbone dans sa biomasse aérienne. A l'instant t du prélèvement, on considère une perte x de carbone. Ainsi, l'allocation de C par le végétal devient une quantité $X-x$. A l'instant $t+1$, le végétal prélevé, s'il n'est pas entièrement consommé, repoussera avec un taux de croissance c associé à la reconstitution d'un nouveau stock de carbone y par création de biomasse. La démarche de calcul est la même dans le cas de la régénération de biomasse après fauche.

Sorties de carbone à l'issu du métabolisme végétal

Le modèle considère que le carbone initialement stocké dans la biomasse végétale sort du système prairial par respiration végétale lorsque la photosynthèse n'a pas lieu (généralement la nuit) (A.-I. Graux et al, 2013).

Sorties de carbone par les composantes animales et microbiennes

PaSim considère que le carbone initialement stocké dans la biomasse végétale sort du système prairial par respiration animale et production de méthane (A.-I. Graux et al, 2013).

Suite au prélèvement végétal, la quantité de carbone perdue lors de l'ingestion et de la digestion animale correspond à la quantité de carbone utilisé par l'animal pour sa respiration et la production de méthane (Armelle Gac et al, 2010). Il a été estimé que jusqu'à 75% du carbone prélevé par les animaux est digéré et respiré (Elisabeth Jérôme et al, 2012). Toutefois, la proportion de carbone perdue dans le système animal dépend de la digestibilité de la plante ingérée régie notamment par sa teneur en lignine et cellulose.

Concernant le facteur faunistique de décomposition de la MO et de son effet sur la dynamique des stocks de carbone, tout comme le modèle SIMEOS-AMG, PaSim ne prend en compte aucune de ces composantes. Toutefois, à l'inverse de SIMEOS, l'outil tient compte d'une consommation de carbone à l'issu de la décomposition de la matière organique par le métabolisme des microorganismes du sol (M. Riedo et al, 1998).

3) Allocation de carbone par la biomasse végétale : estimation des communautés et de leur proportion dans les prairies

Dans le modèle Pasim, la végétation est supposée homogène, c'est-à-dire que l'outil analyse le système en ne tenant compte que des espèces dominantes présentes dans des proportions équivalentes (A.-I. Graux et al, 2013) (M. Riedo et al, 1998). Il est vrai que les prairies peuvent être dominées par une ou plusieurs espèces en particulier, mais il est plus rare que celles-ci occupent la même proportion de surface du système. Bien que cette simplification s'avère adaptée aux systèmes de terres arables, celle-ci peut jouer sur la valeur des estimations finales dans le cas des systèmes prairiaux.

Pour les systèmes de culture, le modèle SIMEOS-AMG utilise des teneurs en carbone de référence dans les parties aérienne et racinaire en fonction de l'espèce cultivée (voir II.B.a et II.B.b). Cela est aussi applicable aux systèmes de prairies lorsque l'on connaît les espèces y figurant. Toutefois, les cultures sont souvent monospécifiques, ce qui ne pose pas de difficulté particulière pour la détermination du peuplement végétal et le choix de la valeur de référence à utiliser dans le calcul. Pour les prairies, systèmes multispécifiques, une difficulté primaire repose sur la détermination des espèces présentes et leur proportion (INRA, 2018). La connaissance de la diversité spécifique est nécessaire au préalable. Pour cela, des relevés de végétation permettant d'établir l'inventaire des espèces présentes et leur abondance peuvent être réalisés (S. Vanpeene Bruhier et al, 1998). Plus l'inventaire et l'abondance des espèces seront précis, plus l'estimation de la quantité de carbone dans la biomasse végétale et racinaire le sera également.

La figure suivante (fig.8) résume graphiquement les facteurs et leurs relations à considérer dans les systèmes prairiaux.

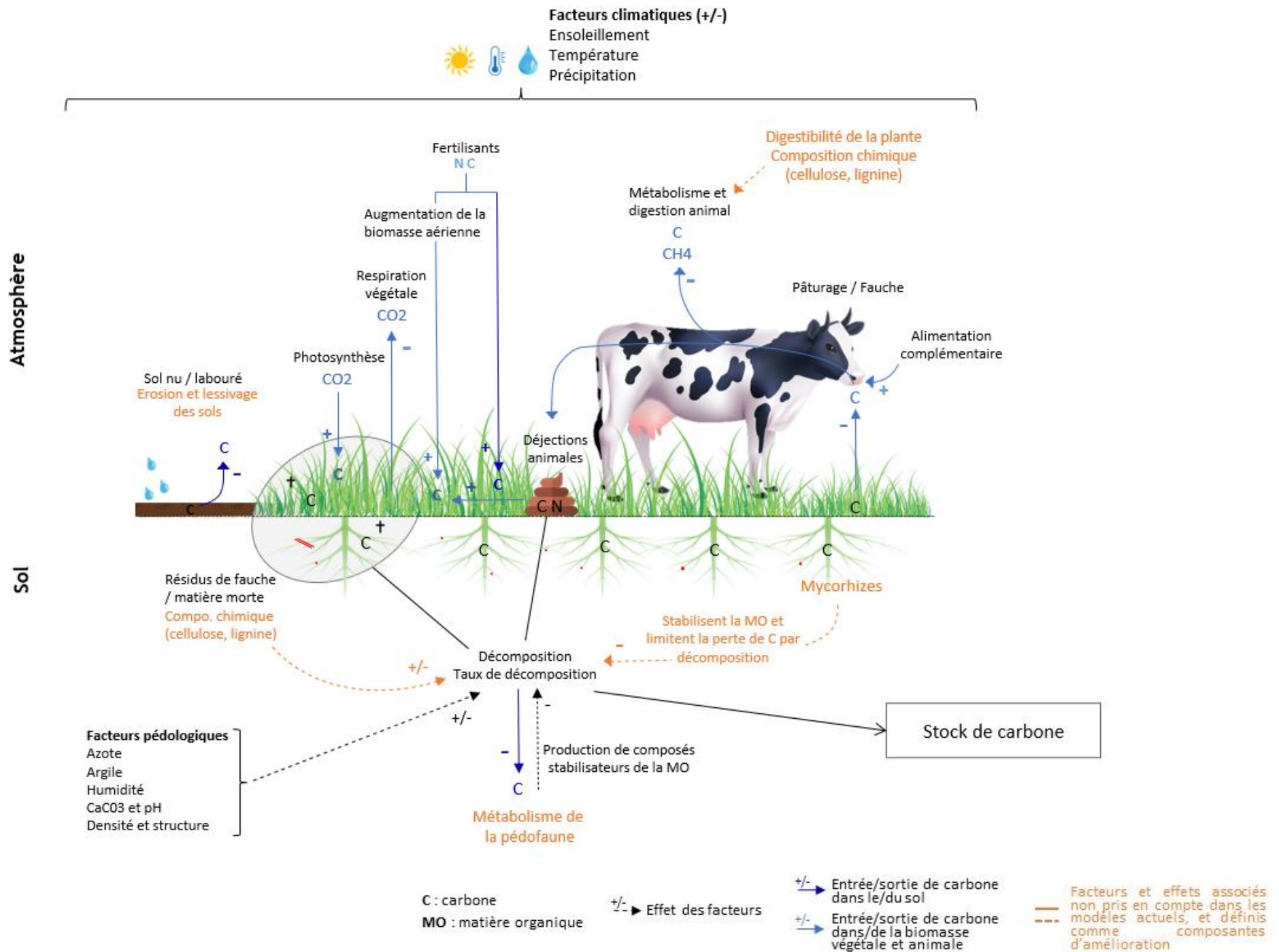


Figure 8 Résumé des facteurs et de leurs relations à considérer dans les modèles pour les systèmes prairiaux (source : C.FOUBLE)

B) Systèmes forestiers : analyse de l'outil FSC

L'outil FSC (Forest Stewardship Council) développé par UNIQUE Forestry and Land Use GmbH, est un outil d'évaluation des flux et des stocks de carbone forestier des systèmes tempérés, tropicaux ou boréales, gérés et exploités, dans le cadre de protocole de gestion raisonnée des forêts. Le modèle est entré en vigueur en 2020, et correspond à l'un des derniers outils mis au point au sujet du carbone forestier (FSC, 2020).

Dans les systèmes forestiers, le stock de carbone est contenu dans la biomasse ligneuse, mais aussi dans les racines et dans toutes les composantes de biomasse qui sont ensuite restituées au sol (feuille composant la litière, bois mort au sol...) (Chenu C. et al, 2014). On distingue un stock de carbone hors sol inclus dans la biomasse aérienne des arbres, dans la litière et le bois, et dans la végétation de sous-bois si elle existe. Le stock de carbone souterrain comprend le carbone de la biomasse racinaire et celui initialement présent dans le sol forestier (Robert Nasi et al, 2008).

Les sols de forêts séquestrent plus ou moins de carbone en fonction des espèces arboricoles cultivées, de l'âge et de la densité des arbres, de la conservation ou non des résidus d'exploitation, du type de culture intercalaire présente dans le cas des systèmes culture-forêt, mais aussi de la composition chimique de la matière organique selon l'essence exploitée (J. Fortier, 2009).

Les facteurs pris en compte par l'outil FSC pour les estimations de carbone sont présentés de manière générale dans le tableau suivant.

Facteur climatique	Facteur pédologique	Facteur de végétation	Facteur de gestion
Zone climatique de l'exploitation (altitude, précipitations, ensoleillement)	Texture (argile, limon, sable) Humidité pH Densité apparente Teneur en azote	Superficie totale de l'exploitation Année de plantation Essence des arbres Biomasse Densité de bois Facteur d'expansion de biomasse Bois mort Litière	Abattage Taux annuel d'extraction de bois Application de fertilisants

Tableau 9 Résumé des facteurs pris en compte par le modèle FSC (source : Manual FSC, 2020)

1) Entrées de carbone dans les systèmes forestiers

Biomasse arboricole

Dans les forêts, le carbone est surtout stocké dans les racines, le tronc et le houppier. Le carbone est inclus dans la biomasse par photosynthèse et retourne au sol par décomposition quand les feuilles tombent, ou quand le bois meurt (Marianne Rubio, 2009). Le modèle FSC donne la possibilité d'inclure le bilan carbone du bois mort et de la litière dans les calculs (Manual FSC, 2020).

Le stock de carbone dans les arbres varie avec l'âge en fonction de la croissance jusqu'à atteindre un point d'équilibre (Inventaire Forestier, 2005). Par hectare, l'âge est le principal facteur de variation du stock de carbone. Ainsi, l'âge des individus est bien à considérer dans

le modèle. L'outil FSC demande en paramètre d'entrée la date de plantation de l'exploitation. Dans le cas des forêts gérées et exploitées, l'âge du peuplement est un paramètre simple à déterminer. Toutefois, il est plus compliqué de dater le peuplement quand il s'agit de s'intéresser aux forêts naturelles et non gérées (Marianne Rubio, 2009).

Le modèle FSC inclut un modèle de simulation de croissance arboricole. Il permet de calculer la croissance annuelle en volume de biomasse en fonction de l'âge des plantations, de la hauteur et du diamètre de tronc moyen, ainsi que de la densité de bois. A partir de ce sous-modèle, le modèle déduit un coefficient d'expansion de biomasse propre à chaque espèce renseignée dans le peuplement. Enfin, à partir des coefficients d'expansion et de la valeur du GIEC de la quantité de carbone contenue par unité de biomasse, l'outil FSC calcul le stock de carbone compris dans les arbres au cours du temps selon l'évolution du système (Manual FSC, 2020).

Age	Number of trees per ha	Height (m)	Mean diameter at breast height	Basal area (m ² /ha)	Standing volume (m ³ /ha)	Form factor
1,0	300	5,0	20,0	9,4	23,6	0,5
5,0	290	5,0	22,0	11,0	27,6	0,5
8,0	295	7,5	21,0	10,2	38,4	0,5
10,0	250	9,2	12,4	3,0	13,9	0,5
15,0	300	10,0	12,5	3,7	18,4	0,5

Species or group of species (dimensionless)	Wood density (t d.m. /m ³)	Carbon fraction Default value = 0.47 (dimensionless)	Biomass expansion factor (dimensionless)
Andira parviflora	0.59	0.47	2
Andira retusa	0.67	0.47	3.4

Figure 9 Paramètres d'entrée et calcul du facteur d'expansion de biomasse du sous-modèle de croissance (source : FSC)

Toutefois, par souci de simplification du modèle, FSC considère une valeur de quantité de carbone par défaut fixée à 0,47 g de carbone par gramme de biomasse (GIEC) quelque soit l'espèce de l'arbre et sa densité de bois (Manual FSC, 2020). Pourtant, il existe dans les peuplements des espèces à plus fort stock de carbone et d'autres à plus faible stock comme illustré au tableau suivant (Inventaire Forestier, 2005). Ainsi, il semblerait qu'utiliser une valeur de quantité de carbone par unité de biomasse propre à chaque espèce permettrait d'améliorer et de préciser l'estimation finale de carbone dans le système.

Peuplements	Stock de carbone par unité de surface
Sapinière	87 tC/ha
Hêtraie	84 tC/ha
Douglas	45 tC/ha

Tableau 10 Stock de carbone par unité de surface pour quelques espèces arboricoles (source : Inventaire Forestier, 2005)

Le modèle FSC prend en compte les facteurs climatiques en fonction de la zone climatique sélectionnée, et influencent la croissance arboricole. Les valeurs de climat comme la pluviométrie, la température ou l'ensoleillement sont fixes et moyennées selon la zone considérée. Toutefois, depuis plusieurs années, le réchauffement climatique modifie les

valeurs de température et de pluviométrie, impactant ainsi la croissance arboricole (P. Gonin et T.Brusten, 2019). Ainsi, les valeurs d'expansion de biomasse arboricole ne sont pas homogènes dans le temps et peuvent changer d'une année à l'autre. Dès lors, pour affiner le modèle de simulation de croissance, il serait pertinent de prendre en compte le fait que le climat change. Ainsi, les valeurs des facteurs climatiques devraient pouvoir être modifiables et entrées à une échelle plus locale dans le modèle.

Enfin, l'outil FSC prend en compte des essences individuelles ou des groupes d'essences aux caractéristiques proches, aboutissant finalement à une simplification du nombre d'espèces dans le système (Manual FSC, 2020). Cela permet de simplifier les calculs d'estimation mais ne rend pas compte de la composition réelle de tous les systèmes forestiers. Les forêts artificielles gérées et exploitées pour leur produit ligneux sont en général des forêts monospécifiques, uniformes, ou les individus sont regroupés par classe d'âge connue, ce qui n'est pas le cas pour les forêts non gérées (Vianney de la Brosse, 2018).

Végétation de sous bois

La végétation de sous-bois correspond aux mousses, herbacées et petits ligneux (Inventaire Forestier, 2005). Cette biomasse végétale, quand elle existe, fait partie intégrante des forêts, et participe au stock de carbone du système. Toutefois, elle n'est pas prise en compte dans le modèle de calcul. Ce manque peut s'expliquer par le fait que la contribution de la végétation de sous-bois au stock de carbone est encore mal connue, et qu'elle représente une faible biomasse dans les forêts gérées et exploitées (A. Porté et al, 2011). Toutefois, si l'on inclut tous les types de forêts dans le modèle, la végétation de sous-bois doit être considérée. En effet, dans l'ensemble des forêts françaises, cette végétation représente environ 4% du stock de carbone des systèmes forestiers (A. Porté et al, 2011).

Pour inclure l'allocation du sous-bois dans le modèle, la biomasse et le stock de C compris dans ce système peuvent être déterminés avec le taux de recouvrement de la surface de l'exploitation par la végétation de sous-bois. Il conviendrait ensuite sur le terrain de déterminer une proportion de chaque classe de végétation (mousse, bas ligneux (<2 mètres), fougère, herbacée). Enfin, en utilisant les taux de recouvrement et une moyenne de hauteur de végétation par classe, il est possible de déterminer un indice volumique de végétation par type. Associé à une valeur de quantité de carbone par unité de biomasse par type de végétal, une estimation du stock de carbone dans la végétation de sous-bois peu être calculée (A. Porté et al, 2011).

Apport de carbone par fertilisation

Le modèle permet l'application de fertilisants et d'engrais, et considère un apport de carbone et d'azote dans le système. La proportion apportée de ces deux éléments est déterminée selon le type de produit appliqué et le taux d'application par hectare de la même manière que le modèle SIMEOS-AMG (Manual FSC, 2020).

2) Sorties de carbone des systèmes forestiers

Sortie de carbone par les activités d'exploitation forestière

Les sorties de carbone des systèmes forestiers peuvent être dues aux opérations forestières de récolte et de gestion de la parcelle (Manual FSC, 2020). Le modèle considère une sortie de

carbone par extraction de bois en fonction d'un taux d'extraction de matériel ligneux pour chaque essence d'arbre.

Sortie de carbone par décomposition et respiration

L'outil FSC est essentiellement utilisé pour les activités d'exploitation forestière à des fins de production de bois. La biomasse, particulièrement celle du bois, n'est alors pas destinée à retourner au sol (Manual FSC, 2020). Ainsi, les facteurs intervenant dans la décomposition de la matière morte, notamment, le bois, sont très limités dans l'outil.

Cependant, plusieurs paramètres agissant sur la décomposition de la litière et du petit bois mort non exploitable et laissé au sol sont toutefois considérés par l'outil. Il s'agit à nouveau de paramètres communs avec le modèle SIMEOS-AMG.

De même, le modèle ne prend pas en compte la composition chimique des éléments dans le processus de décomposition. Pourtant, le taux de décomposition du bois varie selon l'essence dont il provient. Selon l'espèce, le bois se décompose à différente vitesse (tab.11) (T. Lachat et al, 2019).

Vitesse de décomposition	Essences
très rapide	bouleau, hêtre, frêne, tilleul, peuplier
rapide	sapin, épicéa
moyennement rapide	pin, mélèze, douglas
lente à très lente	if, chêne, châtaigner, robinier

Tableau 10 Vitesse de décomposition de quelques essences arboricoles (source : T. Lachat et al, 2019)

La prise en compte de la vitesse de décomposition par essence peut influencer l'estimation finale de la quantité de carbone dans le sol.

Considérons un bouleau régi par une vitesse de décomposition très rapide, et un chêne régi par une décomposition très lente (tab.11), et commençant à se dégrader au même moment. Quand un arbre mort quelconque est laissé au sol, nous savons avec les paramètres de hauteur, de diamètre de tronc et de quantité de carbone contenu dans le bois par unité de biomasse, que l'arbre comporte une quantité x de carbone. Notons ici x_b la quantité de carbone comprise dans le bouleau, et x_c la quantité de carbone comprise dans le chêne. Nous savons que la quantité de carbone dans un arbre mort varie au cours du processus de décomposition selon le taux de décomposition associé à son essence. Comme la vitesse de décomposition et donc le taux de décomposition du bouleau est bien supérieure à celui du chêne, à un instant t , une proportion plus importante de x_b , et une proportion plus restreinte de x_c par rapport à x_b sera allouée au sol. Ainsi, en considérant le fait que la vitesse de décomposition n'est pas la même pour toutes les essences, l'estimation de la quantité de carbone dans le sol à un instant t ne peut probablement pas être égale à l'estimation faite en considérant une vitesse de décomposition identique à toutes les essences. Cela est d'autant plus visible sur des échelles d'estimation lointaines dans le temps.

Dans les forêts exploitées, une fois que le bois est récolté, les souches d'arbre restent dans le sol et participent aussi au stock de carbone du sol après décomposition (T. Lachat et al, 2019). Le modèle ne prend pas en compte ce facteur. Toutefois, FSC considère la proportion en volume de bois exporté. Ainsi pour compléter le calcul, il faudrait retirer la quantité de carbone contenu dans le bois exploité, de la totalité du carbone compris dans la biomasse de l'arbre.

L'outil FSC ne traite pas les forêts non gérées. Dans ce cas, pour compléter le modèle, il faudrait prendre en compte un taux de mortalité des arbres pour avoir une idée de la proportion d'arbre mort par unité de temps et donc de la proportion de matière qui se décompose (T. Lachat, 2019). Dans les forêts exploitées, la mortalité naturelle et le taux associé n'est pas un facteur intéressant à prendre en compte. En effet, dans ces systèmes, le taux de mortalité naturelle est très faible et le bois mort n'est pas restitué au sol dans la plupart des cas puisqu'il est évacué pour la production de bois (T. Lachat, 2019).

A cette proportion estimée d'arbres morts se décomposant, on pourra y appliquer le taux de décomposition propre à chaque essence. Toutefois, dans le cas de forêts multispécifiques, il est difficile de déterminer l'espèce de l'arbre mort et d'y associer le taux de décomposition adapté. Ainsi, pour simplifier la construction du modèle, il faudrait tout de même connaître les espèces dominantes de la forêt modélisée et appliquer le coefficient de décomposition associée à l'espèce dominante.

Enfin, en terme de dégradation de la MO, il existe également une différence de vitesse de décomposition entre les arbres morts au sol et les arbres morts sur pied. Il a été montré que le bois mort au sol est plus vite décomposé que les arbres morts sur pied, ce qui peut influencer l'estimation de la quantité de C dans le sol du système à un instant t de calcul (T. Lachat, 2019). Ainsi, connaître la proportion d'arbres morts au sol par rapport à ceux morts sur pied pourrait permettre d'affiner les estimations.

Sortie de carbone par les perturbations

Le modèle FSC considère des sorties de carbone par exploitation forestière ou par mort et décomposition de la biomasse arboricole. Toutefois, certaines perturbations, qu'elles soient naturelles ou artificielles (incendie, tempête, exploitation illégale...) représentent un facteur de sortie de carbone du système forestier (Marianne Rubio, 2009). Le taux de perturbation, c'est-à-dire la part de biomasse annuelle perdue par les perturbations n'est pas prise en compte par le modèle, mais serait un complément pour l'estimation de la perte de C dans le système.

3) Allocation de carbone par les activités agricoles annexes aux activités forestières

L'outil FSC traite seulement les activités purement forestières. Ainsi, il ne prend pas en compte les systèmes de culture ou de prairies associés dans le cas de l'agroforesterie (Manual FSC, 2020). Au vu des outils de cultures et prairiaux analysés auparavant, il serait intéressant de les combiner pour traiter un maximum d'activité agricole impliquée dans l'initiative 4 pour 1000.

La figure suivante (fig.10) résume graphiquement les facteurs et leurs relations à considérer dans les systèmes forestiers.

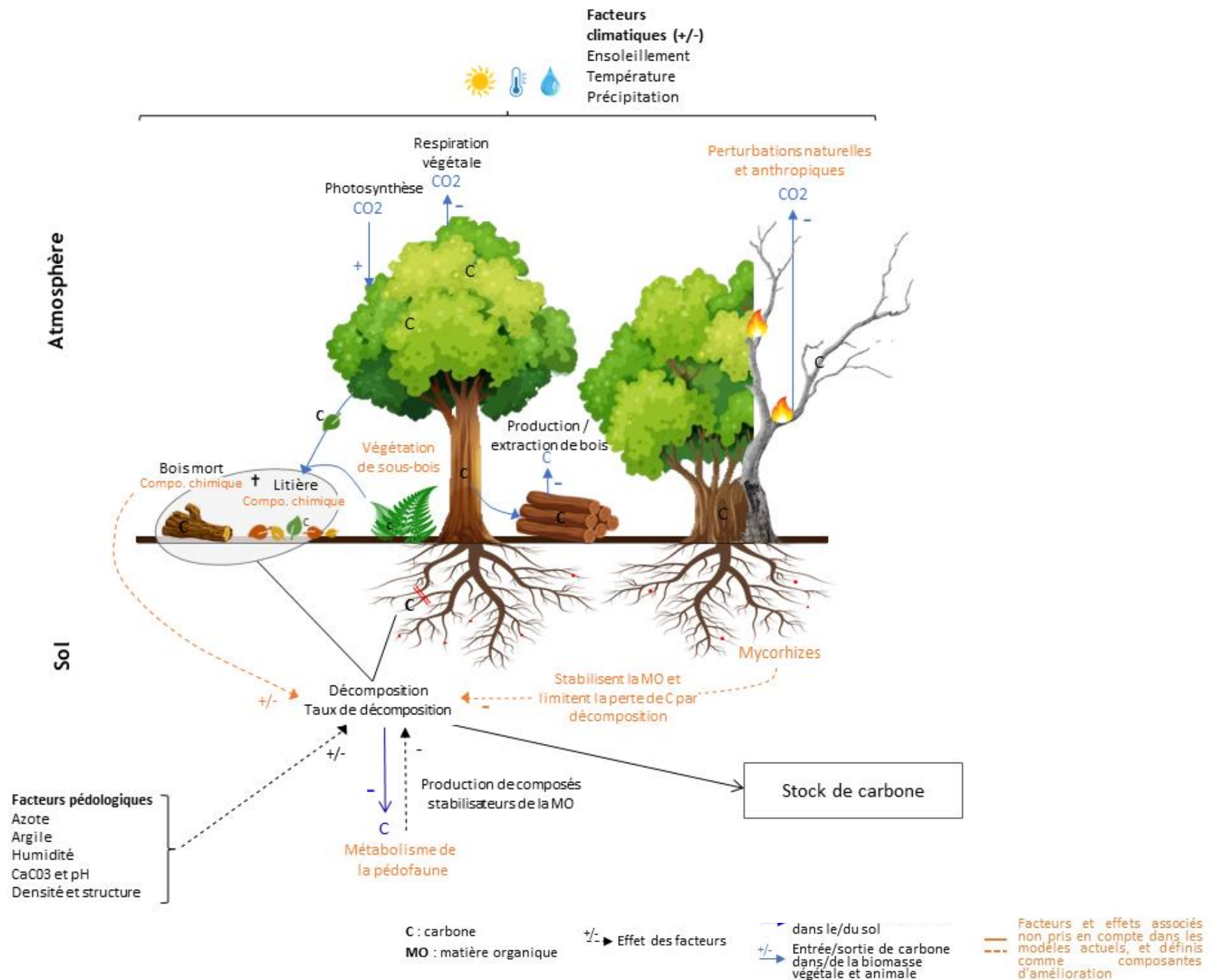


Figure 10 Résumé des facteurs et de leurs relations à considérer dans les modèles pour les systèmes forestiers (source : C.FOUBLE)

C) Sous-systèmes de haies et de bocages dans les systèmes agricoles

Le modèle SIMEOS-AMG ou les autres outils analysés en complément, ne considèrent pas les haies et les bosquets qui peuvent parfois être présents autour de parcelles agricoles. Dans certaines exploitations, ces éléments végétaux peuvent représenter jusqu'à 15% de la surface agricole utile SAU, ce qui n'est pas négligeable dans les estimations (Armelle Gac et al, 2010). Certains systèmes prairiaux présentent des haies et des bosquets. Le stock de carbone inclus dans ses éléments doit également être pris en compte comme entrée.

Le tableau suivant reprend sous forme synthétique l'ensemble des facteurs intervenant dans la dynamique et l'estimation de la quantité de carbone dans les sols dans le cas des différents systèmes agricoles.

Tableau 11 Récapitulatif des facteurs jouant sur les entrées et les sorties de carbone des systèmes agricoles (auteur : C.FOUBLE)

Systèmes agricoles	Facteurs jouant sur les entrées et les sorties de carbone des systèmes	
	Facteurs abiotiques	Facteurs biotiques
Systèmes de terres arables	Entrées	
	<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Ensoleillement Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composante de gestion :</u> Apport de fertilisants exogènes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nature - Quantité et fréquence - Quantité d'azote allouée 	<p><u>Composantes végétales :</u> Photosynthèse Espèces Âge et densité du peuplement Facteur d'expansion de la biomasse Biomasse végétale</p> <ul style="list-style-type: none"> - aérienne : résidus de culture - racinaire : racines et exsudats <p>Mycorhizes</p> <p><u>Composante chimique :</u> Composition chimique de la MO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taux de lignine - Taux de cellulose <p><u>Composante pédofaunistique :</u> Métabolisme et production de composés organiques stabilisateur de la MO</p>
	Sorties	
<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composantes de gestion :</u> Labour Érosion et lessivage des sols</p>	<p><u>Composante pédofaunistique :</u> Métabolisme et décomposition de la MO</p> <p><u>Composante végétale :</u> Respiration végétale</p>	

Systèmes d' espèces pérennes et de prairie permanente	Entrées	
	<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Ensoleillement Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composante de gestion :</u> Apport de fertilisants exogènes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nature - Quantité et fréquence - Quantité d'azote allouée 	<p><u>Composantes végétales :</u> Photosynthèse Espèces Âge et densité du peuplement Facteur d'expansion de la biomasse Biomasse végétale</p> <ul style="list-style-type: none"> - aérienne : matière morte, résidus de fauches et de pâturage - racinaire : racines et exsudats <p>Mycorhizes</p> <p><u>Composantes chimiques :</u> Composition chimique de la MO et digestibilité de la plante ingérée par l'herbivore</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taux de lignine - Taux de cellulose <p><u>Composantes animales :</u> Déjections animales Alimentation complémentaire (grain)</p> <p><u>Composante pédofaunistique :</u> Métabolisme et production de composés organiques stabilisateur de la MO</p>
	Sorties	
<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composante de gestion :</u> Fauche Labour Érosion et lessivage des sols</p>	<p><u>Composante végétale :</u> Respiration végétale</p> <p><u>Composantes animales :</u> Type d'herbivore, âge et densité Pâturage et intensité Respiration animale Digestion (production de méthane CH₄)</p> <p><u>Composante pédofaunistique :</u> Métabolisme et décomposition de la MO</p>	

Systèmes forestiers	Entrées	
	<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Ensoleillement Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composante de gestion :</u> Apports de fertilisants exogènes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nature - Quantité et fréquence - Quantité d'azote allouée 	<p><u>Composantes végétales :</u> Photosynthèse Espèces Âge et densité du peuplement Facteur d'expansion de la biomasse Densité de bois Biomasse végétale</p> <ul style="list-style-type: none"> - aérienne : matière morte au sol et sur pied, résidus d'exploitation - racinaire : racines et exsudats <p>Mycorhizes Végétation de sous-bois (type et densité)</p> <p><u>Composante chimique :</u> Composition chimique de la MO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Taux de lignine - Taux de cellulose <p><u>Composantes pédofaunistiques :</u> Métabolisme et production de composés organiques stabilisateur de la MO</p>
	Sorties	
<p><u>Composantes climatiques :</u> T° Précipitations</p> <p><u>Composantes pédologiques :</u> Taux d'azote Taux d'argile Rapport C/N Taux de CaCO₃ et pH Humidité Densité et structure</p> <p><u>Composante de gestion :</u> Érosion et lessivage des sols Abattage Taux d'extraction de bois Perturbations naturelles et anthropiques</p>	<p><u>Composante pédofaunistique :</u> Métabolisme et décomposition de la MO</p> <p><u>Composante végétale :</u> Respiration végétale</p>	

Conclusion

Au vu des enjeux climatiques actuels, et pour répondre aux objectifs posés par l'initiative 4 pour 1000, les travaux de modélisation des stocks de carbone agricole sont de plus en plus nombreux. Cependant, leurs incertitudes restent importantes. En effet, la dynamique et la quantité de carbone dans les sols sont régies par de multiples facteurs environnementaux (biotique et abiotique). Ce sont autant de facteurs qu'il faut prendre en compte et considérer dans le développement des modèles. Pour que les résultats d'estimation donnés par les outils reflètent au mieux la réalité des stocks, il est nécessaire de prendre en compte le plus de facteurs intervenant dans les mécanismes impliqués dans les modalités de stockage/destockage du carbone, afin d'éviter de délaissier des composantes indispensables aux estimations. Toutefois, il s'agit aussi de considérer dans ces outils que la quantité de carbone dans les sols dépend d'un réseau d'interaction plus ou moins complexe entre les facteurs, qui ne peuvent donc en aucun cas être traités indépendamment les uns des autres.

L'initiative 4 pour 1000 intègre toutes les activités agricoles dans ses objectifs mais en général, et comme vu au fil du travail de recherche, chacun des modèles traite d'une activité particulière. Souvent par gage de simplification, aucun ne considère la multiplicité des activités à l'échelle d'un système (agroforesterie, culture-prairie...). Ainsi un outil qui se veut complet en lien avec l'initiative, se doit de prendre en compte cette modalité.

Cependant, bien qu'on sache qu'il faille considérer les facteurs et leurs relations, leur retranscription mathématique n'est pas aisée et ne facilite pas le développement de ces outils, ce qui est aussi propice à générer des erreurs d'évaluation. Les incertitudes de leurs résultats s'expliquent aussi par le fait que les modèles sont souvent basés sur des estimations du fait de lacunes dans les connaissances scientifiques et dans les méthodes de quantification précises de la quantité de carbone dans les sols. Cela peut expliquer que certains facteurs et relations, notamment chimiques et pédofaunistiques, sont encore absents des outils. Ainsi, ces sujets constituent des bases à développer dans le futur pour compléter, améliorer et préciser les modèles.

Toutefois, bien qu'un outil prenant en compte un maximum de facteurs est plus à même à représenter la réalité des processus de la dynamique du carbone, il faut trouver un équilibre dans sa construction. Un outil trop simplifié est sujet à biaiser les mesures et les évaluations des stocks, mais c'est également le cas des outils trop complexes. En effet, dans la volonté d'inclure un maximum de facteurs et de relations, ils risquent de ne pas répondre aux objectifs pour lesquels ils ont été amenés à être développés.

Malgré la complexité de leur construction, les outils d'estimation proposés restent simples d'utilisation. Les modèles comme SIMEOS-AMG ou FSC sont disponibles gratuitement en ligne, et associés à un guide d'utilisation complet. Ainsi, ils permettent à tous les acteurs agricoles potentiels impliqués dans l'initiative 4 pour 1000 de comprendre et d'orienter leur pratiques pour qu'elles soient les plus favorables à la transition agroécologique attendue. Un des enjeux des outils repose ici : on attend d'eux qu'ils soient exigeants et efficaces pour assurer leur crédibilité, mais ils doivent pour autant rester simples d'utilisation et accessibles financièrement.

Annexe

Annexe 1 : Outil SIMEOS-AMG

Site d'utilisation du modèle: <http://www.simeos-amg.org/>

Page de l'outil : <http://www.agro-transfert-rt.org/ressources/simeos-amg-2/>

Annexe 2 : Modèle PaSim

Site de téléchargement des données du modèle :

<https://data.inrae.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.15454/XCQXOB>

Annexe 2 : Outil FSC

Site de téléchargement du modèle :

<https://fsc.org/en/for-forests/ecosystem-services/ecosystem-services-for-forest-managers>

Bibliographie

- 4p1000. (2018). *Bienvenue sur le site « 4 pour 1000 » | 4p1000*. <https://www.4p1000.org/fr>
- A. Porté et al. (2011). *Détermination de la biomasse aérienne du sous-bois de peuplements adultes de Pin maritime : Contribution à la quantification des stocks de carbone forestier à l'aide d'indicateurs de couvert*. http://www.iefc.net/activites/FORSEE/rapports/FORSEE_Aquitaine.C1.sous_bois.pdf
- Actu Environnement. (s. d.). *Définition de Lessivage*. Actu-Environnement; Actu-environnement. https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/lessivage.php4
- Agrotransfert. (s. d.). *Agro Transfert—SIMEOS-AMG* -. <http://www.agro-transfert-rt.org/ressources/simeos-amg-2/>
- A.-I. Graux et al. (2013). *Adaptation des systèmes d'élevage bovins au changement climatique : Intérêts, limites et perspectives des approches de modélisation*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01210392/document>
- A. Metay et al. (2009). *Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré*.
- Annie Duparque et al. (2007). *Evolution de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle : De nouveaux outils pour une démarche de conseil fondée sur le bilan humique AMG*. http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2016/03/Evolution_de_l%C3%A9tat_organique_du_sol_%C3%A0_l%C3%A9chelle_de_la_parcelle-1.pdf
- Armelle Gac et al. (2010). *Le stockage de carbone par les prairies*. <https://hal.inrae.fr/hal-02824535/document>
- Chenu C. et al. (2014). *Stocker du carbone dans les sols agricoles : Évaluation de leviers d'action pour la France*.
- Claire Marsden. (s. d.). *Décomposition de la matière organique*. https://www.supagro.fr/ressources/Opale/ProcessusEcologiques/co/DecompositionMO_1.html
- Danielle Jacques. (2014). *Gérer le pH du sol, un plus pour sa fertilité*. <https://www.laterre.ca/actualites/gerer-le-ph-du-sol-un-plus-pour-sa-fertilite>
- D. Derrien et al. (2016). *Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ?*
- E. Blanchart et al. (2004). *Pertes en carbone par érosion et drainage et variations de stocks de C en deux ans sous différentes pratiques en culture bananière (Martinique)*. <https://docplayer.fr/191433208-Pertes-en-carbone-par-erosion-et-drainage-et-variations-de-stocks-de-c-en-deux-ans-sous-differentes-pratiques-en-culture-bananiere-martinique.html>
- Elisabeth Jérôme et al. (2012). *Stockage de carbone et flux de gaz à effet de serre en prairie (synthèse bibliographique)*. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=16881&file=1&pid=9610>
- Food and Agriculture Organization. (s. d.). *Gestion des forêts, des pâturages et des sols cultivés en vue d'augmenter la séquestration du carbone dans les sols*. <https://www.fao.org/3/y2779f/y2779f05.htm>

- FSC. (2020). *L'outil FSC pour le suivi du carbone forestier est maintenant disponible*. Forest Stewardship Council.
<https://fr.fsc.org/en/node/29143>
- Georges Bachelier. (1974). *Action de la faune du sol sur l'humification des matériaux végétaux*.
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_06-07/06792.pdf
- Georges Wauthy. (1982). *Revue critique des relations entre la faune, la matière organique et les microorganismes dans les horizons organiques forestiers*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00884431/document>
- Hugues Clivot et al. (2019). *Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model*. http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2019/11/1-s2.0-S1364815218307643-main_web.pdf
- INRA. (2018). *Utilisation d'un modèle de prairie, PaSim, dans le cadre de l'expertise 4p1000*.
https://lisc.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/12/18-12_Martin_4p100_PaSim.pdf
- INRAE. (2019). *AMG model description*. <https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/agroimpact/Nos-dispositifs-outils/Modeles-et-outils-d-aide-a-la-decision/AMG-et-SIMEOS-AMG/AMG-model-description>
- Inventaire Forestier. (2005). *La forêt française : Un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques*. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/L_IF_no07_carbone.pdf
- J. Fortier. (2009). *Dossier carbone, 4ème numéro : La séquestration du carbone par les systèmes agroforestiers*.
<http://www.rlq.uqam.ca/cartable/inforlq/InfoRLQvol6no3janvier2009.php>
- J. Moreno-Cornejo et al. (2014). *Carbon and nitrogen mineralization during decomposition of crop residues in a calcareous soil*.
https://www.academia.edu/11026140/Carbon_and_nitrogen_mineralization_during_decomposition_of_crop_residues_in_a_calcareous_soil
- J.A. Langley et al. (2006). *Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition : The post-mortem fungal legacy*. <https://ecoss.nau.edu/wp-content/uploads/2016/04/Langley-et-al-2006-Ecology-Letters.pdf>
- Jean Boiffin et al. (1986). *Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : Application du modèle de Hénin-Dupuis*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00884894/document>
- Jeremy Puissant. (2015). *Effets des changements climatiques sur la dynamique de décomposition microbienne du carbone organique du sol en prairie subalpine calcaire*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01259628/document>
- Juliane Filser. (2016). *Soil fauna : Key to new carbon models*. <https://soil.copernicus.org/articles/2/565/2016/soil-2-565-2016-discussion.html>
- La France Agricole. (s. d.). *Environnement : 1300 agriculteurs candidats pour séquestrer du carbone*. La France Agricole. Consulté 3 avril 2021, à l'adresse <https://www.lafranceagricole.fr/actualites/climat-lancement-dun-label-bas-carbone-1,7,1057467377.html>

- Laetitia Hacker. (2017). *Effet de la fertilisation NPK sur la dynamique de croissance racinaire en prairie permanente fauchée*. <https://hal.inrae.fr/hal-02788556/document>
- L.Amdouni-Boursier et R.Goffaux. (2019). *Stockage du carbone dans les prairies similaires à celles qui sont gérées par les aéroports*. <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2019/12/FRB-Rapport-Carbone-prairies-aeroportuaires-2019.pdf>
- M. Riedo et al. (1998). *A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy*. <https://ur.booksc.eu/book/17917611/ad2296>
- M.A. Bolinder et al. (2007). *An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada*. <https://www.verdeterreprod.fr/wp-content/uploads/2020/05/bolinder-et-al-2007-methode-principale-1.pdf>
- Manual FSC. (2020). *User's Manual for FSC Forest Carbon Monitoring Tool*. <https://fsc.org/en/forests/ecosystem-services/ecosystem-services-for-forest-managers#documents>
- Marianne Rubio. (2009). *Le bois énergie : Enjeux écologiques et de santé environnementale—Forêt et cycle du carbone*. https://www.appa.asso.fr/wp-content/uploads/2020/02/Rubio_2009.pdf
- Martin Komanda et al. (2018). *The effects of maize hybrid and harvest date on above- and belowground biomass dynamics, forage yield and quality—A trade-off for carbon inputs ?*
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2013). *Qu'est-ce que l'agroécologie ? | Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*. <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-lagroecologie>
- P. Gonin et T.Brusten. (2019). *Les besoins des arbres et leur évaluation*. https://www.srfb.be/wp-content/uploads/2019/07/9_Les_besoins_des_arbres.pdf
- Pascal Boivin. (2021). *Le rôle du carbone en agriculture*. <https://www.youtube.com/watch?v=917z47-UgzA>
- P.L. Yemadje. (2015). *Influence des cycles humectation-dessiccation sur la minéralisation du carbone : Cas de la zone cotonnière du Nord Cameroun*.
- P.Lavelle et C.Gilot. (1994). *Priming effects of macroorganisms on microflora : A key process of soil function ?* https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-09/010028302.pdf
- Robert Nasi et al. (2008). *Un aperçu des stocks de carbone et leurs variations dans les forêts du Bassin du Congo*. https://www.researchgate.net/publication/232660166_Un_aperçu_des_stocks_de_carbone_et_leurs_variations_dans_les_forets_du_Bassin_du_Congo
- S. Vanpeene Bruhier et al. (1998). *La richesse spécifique : Un outil pour la prise en compte de la biodiversité dans la gestion de l'espace—Application en Haute Maurienne (Aussois, Savoie)*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00461198/document>
- Sabrina Juarez et al. (2013). *Effects of different soil structures on the decomposition of native and added organic carbon*.

https://www.academia.edu/15099673/Effects_of_different_soil_structures_on_the_decomposition_of_native_and_added_organic_carbon

Samuel Abiven et al. (2011). *Lignin content and chemical characteristics in maize and wheat vary between plant organs and growth stages : Consequences for assessing lignin dynamics in soil.*

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-0725-y>

T. Lachat et al. (2019). *Bois mort en forêt : Formation, importance et conservation.*

https://www.researchgate.net/publication/263428756_Bois_mort_en_foret_Formation_importance_et_conservation

Vianney de la Brosse. (2018). *Exploitation forestière : Comment ça marche ?*

<https://ecotree.green/blog/exploitation-forestiere-comment-ca-marche>

Vincent Freycon. (2016). *Appui pédologique au projet CARPAGG - Sols de prairies de Guyane : Diagnostic et profils de référence. Calcul du stock de carbone d'un sol.* <https://agritrop.cirad.fr/581452/>

Wikipédia. (2021). 4p1000. In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=4p1000&oldid=181325103>

Yongwei Fu et al. (2019). *Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198719300868>

Directeur de recherche :
GRELLIER Séraphine

Auteur :
FOUBLE Camille (Option ADAGE)
DAE 5 – PFE 2021-2022

4/1000 un outil, pour une transition agroécologique réussie : Une gestion durable des sols pour séquestrer le carbone et limiter le changement climatique.

Résumé :

L'initiative 4 pour 1000 est une initiative internationale visant à réduire significativement, à travers le secteur agricole, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère liée aux activités humaines. Son objectif consiste en une croissance annuelle de 4‰ des stocks de carbone dans les sols. Cela passe notamment par l'adoption et la mise en place d'actions concrètes. Pour faire les bilans de l'avancée de l'initiative, s'assurer qu'elle fonctionne et que tous les acteurs répondent à l'engagement pris, des outils de suivi sont mis en place pour connaître la quantité de carbone stockée dans les terres agricoles.

Toutefois, les modèles s'appuient en général sur un ensemble de facteurs restreints rendant les estimations incertaines. Ainsi, l'objectif de ce travail consiste en une analyse des outils d'estimation de la quantité de carbone dans les sols agricoles aujourd'hui disponibles (SIMEOS-AMG, PaSim et FSC) afin d'identifier de potentielles pistes d'amélioration de ceux-ci.

Les facteurs impliqués dans les modalités de stockage du carbone et considérés par les outils ont été analysés et comparés avec ceux déterminés dans la bibliographie. A l'issue du travail, il a été remarqué que certains facteurs sont à compléter. D'autres, en particulier biotiques, sont totalement absents. Ces manquements s'expliquent par des lacunes dans les connaissances et dans les méthodes de quantification précises de la quantité de carbone dans les sols ; mais aussi par la difficulté de retranscription mathématique des relations entre facteurs. Cela rend donc les outils propices à de fortes incertitudes. Toutefois, il faut trouver un équilibre dans la construction des outils concernant le nombre de facteurs à considérer, au risque d'amplifier les incertitudes d'estimation ou de ne pas répondre aux objectifs pour lesquels ils sont amenés à être développés. Un des enjeux repose ici : on attend d'eux qu'ils soient exigeants et efficaces pour assurer leur crédibilité, mais ils doivent pour autant rester simple d'utilisation et accessible financièrement.

Mots clés : Initiative 4 pour 1000 / sols / carbone / pratiques agricoles / cycle du carbone / modalités de stockage-déstockage de carbone / facteurs / outils d'estimation de la quantité de carbone