



HAL
open science

Analyse des méthodologies d'évaluation et de suivi du bilan carbone des sols et recommandations pour l'écriture d'une méthode grande culture dans le cadre du label Bas-Carbone. Rapport ADEME. Convention n*18-03-C0034.

Wendtwain Imelda Gécica W. I. G. Yogo, Hugues Clivot, Taeken Wijmer, Eric Ceschia, Fabien Ferchaud, Suzanne Reynders, Jean-Francois Soussana

► **To cite this version:**

Wendtwain Imelda Gécica W. I. G. Yogo, Hugues Clivot, Taeken Wijmer, Eric Ceschia, Fabien Ferchaud, et al.. Analyse des méthodologies d'évaluation et de suivi du bilan carbone des sols et recommandations pour l'écriture d'une méthode grande culture dans le cadre du label Bas-Carbone. Rapport ADEME. Convention n*18-03-C0034.. [Rapport de recherche] INRAE; LISIS; NATAÏS. 2021. hal-03212854v2

HAL Id: hal-03212854

<https://hal.inrae.fr/hal-03212854v2>

Submitted on 26 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



© P. Van Hatt - Shutterstock.com



INRAE



Méthodologies d'évaluation et de suivi du bilan carbone des sols et recommandations pour l'écriture d'une méthode Label Bas Carbone

Demonstrateurs territoriaux du stockage de carbone dans les sols
Rapport final livrable 1/3 - [Mai 2021]

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les développeurs des méthodologies et outils ainsi que les experts scientifiques et techniques des équipes INRAE pour leurs précieuses contributions.

CITATION DE CE RAPPORT

Yogo W.I.G., Clivot H., Taeken W., Ceschia E., Ferchaud F., Reynders S., Soussana J.-F. 2021. Analyse des méthodologies d'évaluation et de suivi du bilan carbone des sols et recommandations pour l'écriture d'une méthode grande culture dans le cadre du label Bas-Carbone. Rapport ADEME. Convention n°18-03-C0034. DOI [10.15454/bee-9s49](https://doi.org/10.15454/bee-9s49)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

ELEMENTS DE VOCABULAIRE.....	7
1. INTRODUCTION.....	8
2. DYNAMIQUE SUSCITEE PAR LE PROJET	8
3. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES METHODOLOGIES DE SUIVI DU BILAN GES ET DU STOCKAGE DE CARBONE.....	9
3.1. Procédure et résultats de l'analyse bibliographique	9
3.2. Développements réalisés et en cours dans le contexte français	12
4. APPROCHES ET RECOMMANDATIONS POUR L'ESTIMATION ET LA CERTIFICATION DE LA VARIATION DU STOCK DE CARBONE ORGANIQUE DU SOL	18
4.1. Analyse préliminaire du potentiel de stockage à l'échelle de l'exploitation	18
4.2. Options pour l'évaluation et le suivi du bilan de carbone organique d'un sol de grandes cultures	19
4.2.1. Option 1 : Simeos-AMG avec une extension ABC'Terre pour le bilan GES complet	19
4.2.2. Option 2 : SAFY-CO2 et suivi des couverts par télédétection	21
4.2.3. Option 3 : Couplage SAFY-CO ₂ – AMG, spatialisation du stock de carbone du sol en surface	22
4.3. Sensibilité du bilan de carbone estimé par le modèle AMG à la propagation des incertitudes sur les variables d'entrée et paramètres du modèle	23
4.3.1. Propagation des incertitudes des variables d'entrée et des paramètres du modèle selon deux scénarios de données d'entrée (mesures fines ou données régionales).....	23
Comparaison de scénarios sans et avec pratiques stockantes (introduction de couverts	23
intermédiaires et apports de produits organiques résiduels).....	23
4.3.2. L'erreur sur les variations de stock pour des systèmes présentant un fort stockage de C par rapport à un système témoin	26
4.3.3. L'erreur sur les variations de stock pour des systèmes présentant un fort stockage de C par rapport à un système témoin	26
4.4. Intégration des principes du Label Bas-Carbone pour l'écriture d'une méthodologie	28
4.4.1. Le périmètre.....	28
4.4.2. Les pratiques et leurs combinaisons.....	28
4.4.3. Le scénario de référence	29
4.4.4. Les rabais pour le risque de non permanence :	30
4.4.5. La procédure de vérification	31
FIGURES SUPPLEMENTAIRES.....	31
5. CONCLUSION.....	33
6. ANNEXES FICHES METHODOLOGIES	34
6.1. Fiches des outils (modèles notamment) utilisés pour l'évaluation et le suivi du bilan carbone en France et à l'étranger : AMG, STICS, RothC, FullCAM, Rock-Eval ®, CAP'ZER ®	34
6.1.1. AMG	34
6.1.2. STICS	35
6.1.3. Métamodèle du projet CarSolEI	36

6.1.4.	Rothamsted Carbon: Roth-C	37
6.1.5.	Fully integrated Carbon Accounting Model: FullCAM.....	38
6.1.6.	Rock-Eval®.....	39
6.1.7.	Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevage de Ruminants : CAP'2ER®	40
6.2.	Fiches des méthodologies développées ou en cours de développement en France et à l'étranger pour l'évaluation et le suivi des réductions d'émissions : CarbonAgri, Méthodologie SAFY-CO2, COMET Farm, VCS SALM, VCS VM0042, ABC'Terre, MAELIA, Méthode haie-CARBOCAGE, Measurement of Soil Carbon Sequestration in Agricultural Systems Methodology determination 2018, COOL FARM TOOL, Carbon Navigator, CARBON EXPERT.	41
6.2.1.	CarbonAgri.....	41
6.2.2.	SAFY-CO2, Simple Algorithm For Yield and CO ₂ flux estimates:.....	42
6.2.3.	CarbOn Management Evaluation Tool for whole FARM GHG accounting : COMET-Farm	43
6.2.4.	VCS – Adoption of Sustainable Agricultural Land Management: SALM.....	44
6.2.5.	VCS VM0042 – Methodology for Improved Agricultural Land Management.....	45
6.2.6.	Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre agricole intégrant le Carbone du sol, sur un Territoire: ABC'Terre.....	46
6.2.7.	Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment: MAELIA	47
6.2.8.	Méthode haie - CARBOCAGE.....	48
6.2.9.	Measurement of Soil Carbon Sequestration in Agricultural Systems Methodology determination 2018.....	49
6.2.10.	Alberta Carbon offset system – Quantification protocol for conservation cropping: The Conservation Cropping Protocol (CCP)	50
6.2.11.	COOL FARM TOOL.....	51
6.2.12.	Carbon Navigator.....	52
6.2.13.	CARBON EXPERT	53
7.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54

RÉSUMÉ

La France fait face à un défi majeur pour le secteur agricole : elle doit viser 37 % de réduction des émissions d'ici à 2030 par rapport à l'année de référence de 2005 pour l'ensemble des secteurs non ETS, dont l'agriculture (Effort Sharing Decision). A cet enjeu de réduction s'ajoute un enjeu de séquestration qui peut apporter une réponse satisfaisante à la volonté nationale de contribuer à l'effort global d'adaptation et d'atténuation des impacts du changement climatique. Le potentiel de stockage de carbone dans les sols agricoles français est élevé : 1008 Mt C pour la couche arable, 1360 Mt C pour le sol profond (Chen et al., 2018). La restitution de l'étude nationale « 4 pour 1000 » en Juin 2019 a mis en lumière le potentiel technique de séquestration de carbone dans les sols agricoles français, ainsi qu'une évaluation économique (coût technique) de la séquestration de carbone dans le sol. Dans le but de participer à l'établissement des mesures effectives et incitatives visant à séquestrer le C dans les sols, ce projet financé par l'ADEME vise tout d'abord à proposer un protocole de mise en place d'une méthode MRV (Monitoring Reporting Verification) d'évaluation du stockage de C à bas coût, robuste, simple dans sa mise en œuvre et reproductible dans différents contextes et sur de grands territoires et d'en dessiner les limites. Avec une labélisation bas carbone associée, des crédits C pourront être générés et vendus sur le marché de C volontaire qui a un fort potentiel en Europe mais jusqu'alors peu développé. Le deuxième objectif du projet est donc d'analyser les différents modèles d'affaires des démonstrateurs C permettant une rémunération accrue des agriculteurs pratiquant le stockage de C. Ainsi, nous proposons dans le livrable 1 ([ce document](#)), trois options d'évaluation et de suivi du bilan C possibles avec différentes méthodologies, outils et données mobilisables ainsi que des recommandations pour le cas particulier des grandes cultures en France. Nous mettons en lumière l'impact des incertitudes des données d'entrées des méthodes MRV sur les estimations de stocks de C et l'intérêt d'aller à terme vers des méthodes incluant la télédétection dans une dynamique de déploiement territoriale. Le livrable 2 propose par ailleurs une analyse des différents modes de financements autour de la séquestration C y compris la valorisation au sein des chaînes de valeur agro-alimentaires, les financements d'origine citoyenne ou encore l'intermédiation par des plateformes ou organismes agrégateurs en plein développement. La valeur financière générée par l'agriculteur qui stocke du C doit être préservée face aux coûts MRV et administratifs liés au processus de certification C. D'autres modèles économiques existent, notamment en lien avec divers labels alimentaires non étudié dans le cadre de ce projet. Il serait donc pertinent d'avoir une analyse de la contribution de ces différents modèles et les possibilités d'articulations avec le label bas carbone (LBC) pour assurer efficacement des revenus nets positifs aux agriculteurs en transition. Enfin le livrable 3 identifie les principales priorités de R&D pour la mise en œuvre de projets collectifs et territoriaux de stockage de carbone dans les sols agricoles.

ABSTRACT

France is facing a major challenge for the agricultural sector: it must aim for a 37% emissions reduction by 2030 compared to the 2005 baseline for all non-ETS sectors, including agriculture (Effort Sharing Decision). In addition to this reduction challenge, there is also a sequestration challenge that can provide a satisfactory response to the national aim to contribute to the global effort for climate change adaptation and mitigation. The carbon (C) storage potential in French agricultural soils is high: 1008 Mt C for the topsoil, 1360 Mt C for the deep soil (Chen et al., 2018). The restitution of the national study "4 for 1000" in June 2019 highlighted the technical potential as well as an economic evaluation (technical cost) of carbon sequestration in French agricultural soils. In order to participate in the establishment of effective and incentive measures to sequester C in soils, this project funded by ADEME aims first to propose a protocol for the implementation of a low-cost MRV (Monitoring Reporting Verification) method for assessing C storage that is robust, simple to implement and replicable in different contexts and on large territories, and to draw its limits. With an associated low-carbon label, C credits could be generated and sold on the voluntary C market, which has great potential in Europe but has been underdeveloped until now. The second objective of the project is therefore to analyze the different business models of C demonstrators allowing for increased remuneration of farmers practicing C storage. Thus, in Deliverable 1 ([this document](#)), we propose three possible options for C balance evaluation and monitoring with different methodologies, tools and data that can be mobilized, as well as recommendations for the specific case of field crops in France. We highlight the impact of the uncertainties of the input data in the MRV methods on C stock estimates and the interest of moving towards methods that include remote sensing for a territorial deployment dynamic. Besides, Deliverable 2 proposes an analysis of the different types of financing around C sequestration, including value addition within agri-food value chains, citizen financing, and intermediation via organizations or platforms as aggregators that are expanding. The financial value generated by the farmer who stores C must be safeguarded in the face of the MRV and administrative costs associated with the C certification process. Other economic models exist, such as those in connection with various food labels that were not studied in this project. It would therefore be relevant to have an analysis of the contribution of these different models and the possibilities of articulations with the low carbon label (LBC) to effectively ensure positive net income for farmers in transition. Finally, Deliverable 3 identifies the main R&D priorities for the implementation of collective and territorial projects for carbon storage in agricultural soils.

ELEMENTS DE VOCABULAIRE

Méthode : Le Label bas-carbone s'appuie sur le développement de méthodes de réduction des émissions. Les méthodes précisent notamment, pour un type de projet donné, comment le scénario de référence doit être déterminé et comment les réductions d'émissions du projet sont calculées. Le terme méthode se traduit en anglais par « Methodology » dans le jargon des marchés de carbone volontaires.

Méthodologies : moyens par lesquels sont effectivement calculées les réductions d'émissions à partir de mesures directes, de données statistiques moyennes ou encore de modèles de processus. Les méthodologies peuvent devenir à terme des méthodes lorsqu'elles sont passées par un processus de certification.

Dans le présent rapport nous utilisons « méthode » en référence aux méthodologies françaises labélisées bas carbone.

1. Introduction

Le livrable 1 fait état des méthodologies, outils et données mobilisables pour la rédaction d'une méthodologie d'évaluation robuste, suffisamment précise et à faible coût des effets sur le stockage de carbone dans le sol, la production agricole et le climat (bilan gaz à effet de serre - GES) des changements de pratiques agricoles.

Dans la suite de ce document, seront présentés :

- un aperçu de la dynamique créée autour du projet sera d'abord présentée ainsi que les impacts sur l'organisation des parties prenantes pour l'écriture d'une Méthode grandes cultures dans le cadre du Label Bas-Carbone (LBC).
- les résultats de l'analyse bibliographique avec une description des méthodologies ainsi que leurs potentiels et limites.
- des recommandations basées sur de récentes simulations à destination des filières pour la rédaction de la méthode label Bas-Carbone grandes cultures (LBC GC).

2. Dynamique suscitée par le projet

Conformément aux activités initialement prévues pour la conduite de l'étude, nous avons organisé et animé plusieurs réunions conjointement avec I4CE et l'ADEME.

Deux réunions directement liées aux objectifs 1 et 2 du projet :

- Le 24 Juin 2019, 18 participants : cette rencontre a principalement permis d'identifier les porteurs/développeurs de méthodologies et outils dont modèles sous-jacents et d'avoir un aperçu de l'état des recherches sur le sujet.
- Le 3 septembre 2019, 82 participants : cette deuxième rencontre a récolté un grand intérêt auprès des porteurs de projets et des financeurs potentiels qui ont pu exprimer leur volonté de s'impliquer dans le développement d'une méthode pour le label Bas-Carbone.

A l'issue de ces premières rencontres, quatre réunions réunissant les différents acteurs intéressés par l'écriture d'une méthode pour le label Bas-Carbone ont été organisées au centre siège de l'INRAE. Ces réunions ont permis d'amorcer la réflexion avec l'objectif de mutualiser les efforts et limiter la multiplicité des méthodes sur des périmètres se recoupant :

- 23 octobre 2019, 11 participants : groupe de travail prairies
- 29 octobre 2019, 26 participants : groupe de travail grandes cultures
- 30 octobre 2019, 18 participants : groupe de travail haie/agroforesterie/arboriculture/viticulture
- 12 décembre 2019, 20 participants : groupe de travail prairie et grandes cultures

L'ensemble de ces échanges a créé une dynamique auprès des filières qui se sont réunies en consortium pour piloter l'écriture d'une méthode LBC GC avec l'appui logistique de l'entreprise Agrosolutions.

D'autres méthodes LBC se développent, notamment haie-CARBOCAGE (piloté par la chambre d'agriculture pays de Loire), agroforesterie (piloté par l'APCA), fruits (piloté par la compagnie des amandes en cours de validation), légumineuse (piloté par Agrosolutions).

Les nombreux échanges bilatéraux ont donné lieu à des interrogations sur la propagation des incertitudes et à la création d'un groupe de travail INRAE dédié :

- 11 décembre 2019, 7 participants : identification des problématiques liées à l'évaluation des incertitudes des modèles et à la propagation des incertitudes des données d'entrées.
- 2 avril 2020, 10 participants : proposition d'un protocole de calcul de la propagation des incertitudes.

3. Analyse bibliographique des méthodologies de suivi du bilan GES et du stockage de carbone

L'analyse bibliographique a permis de recenser une liste non exhaustive de 20 méthodologies (tableau 1), outils, modèles et données mobilisables pour le suivi des stocks de carbone et des émissions des GES développées en France ou à l'international pour différents types de cultures, de sols et de climats. Nous présentons ces résultats d'un point de vue global avant de développer notre analyse pour le cas particulier de la France et sur le périmètre des grandes cultures.

3.1. Procédure et résultats de l'analyse bibliographique

L'identification s'est déroulée avec premièrement, une attention sur les méthodologies et outils dont modèles permettant d'évaluer les émissions d'au moins un des trois gaz à effet de serre (GES) principaux (CO₂, N₂O, CH₄) et/ou le stockage de carbone dans le sol et la biomasse aérienne, avec différentes bases de calcul. Les types de calcul sous-jacents incluent des modèles (empiriques, sol-plante, dynamique de sol, agro météorologique), des facteurs d'émissions du GIEC de niveau Tier1 (valeurs par défaut) ou Tier2 (valeurs régionales/nationales) et l'utilisation de données satellitaires. Deuxièmement, nous avons pris en compte des méthodologies et outils ayant divers périmètres d'application pour une meilleure représentativité de la diversité du monde agricole. Ainsi, nous avons considéré les périmètres couvrant les grandes cultures, prairies, élevages, haies, forêt etc. représentés à différentes échelles (parcelle, ferme ou exploitation) (tableau 1).

Tableau 1 : Liste des 20 méthodologies, outils dont modèles et données mobilisables recensées en France et à l'international

Nom	Type	Echelle	Précision de calcul du stockage de carbone	Certification	CO2	N2O	CH4
STICS	Modèle sol-plante	Parcelle	Tier 3	non	oui	oui	non
FullCAM	Modèle sol	Parcelle	Tier 3	non	oui	oui	oui
Rock'Eval®	outil	Parcelle	Tier 3	non	oui	non	non
VCS (SALM)	Méthodologie GES	Parcelle	Tier 3	oui	oui	oui	oui
SAFY-CO2	Méthodologie bilan carbone	Parcelle	Tier 3	non	oui	non	non
AMG	Modèle sol	Parcelle	Tier 3	non	oui	non	non
Métamodèle du projet CarSolEI	Métamodèle statistique	Parcelle	Tier 3	non	oui	oui	non
RothC	Modèle sol	Parcelle	Tier 3	non	oui	non	non
COMET-Farm Tool	Méthodologie GES	Parcelle	Tier 3	non	oui	oui	oui
VCS VM0042	Méthodologie GES	Parcelle	Tier 3	oui	oui	oui	oui
MAELIA	Méthodologie GES	Parcelle	Tier 3	non	oui	oui	non

ABC'Terre	Méthodologie GES	Territoire	Tier 2 sauf modèle sol (Tier 3 - AMG)	non	oui	oui	non
Australia- Methodology determination 2018	Méthodologie GES	Zones d'estimation de carbone définie selon le protocole	Tier 2	oui	oui	oui	oui
Alberta (CCP)	Méthodologie GES	Zones d'estimation de carbone définie selon le protocole	Tier 2	oui	oui	oui	oui
CAP'2ER®	outil	Atelier animal ou végétal	Tier 1	oui	oui	oui	oui
Méthode CarbonAgri	Méthodologie GES	Atelier animal ou végétal	Tier 1	oui	oui	oui	oui
Méthode haie- CARBOCAGE	Méthodologie GES	Exploitation agricole	Tier 1	non	oui	non	oui
Cool Farm Tool	Méthodologie GES	Exploitation agricole	Tier 1	non	oui	oui	oui
CARBON EXPERT	Méthodologie compostage	Territoire	Tier 1	non	oui	oui	oui
CARBON Navigator	Méthodologie GES	Exploitation agricole	Tier 1	non	oui	oui	oui

Une première observation rapide permet de distinguer deux grands groupes à savoir les méthodologies certifiées par un organisme national ou international et celles non encore certifiées. Six méthodologies sont d'ores et déjà liées à un cadre de certification **national** (4 au total : la méthode *CarbonAgri* et la méthode *Haie* en France, *Alberta Conservation Cropping Protocol* au Canada et *Measurement of Soil Carbon Sequestration in Agricultural Systems Methodology determination 2018* en Australie) ou **international** (2 au total : *Verified Carbon Standard (VCS) - Adoption of Sustainable Agricultural Land Management* et *VM0042 Methodology for Improved Agricultural Land Management*).

On peut également remarquer dans un deuxième temps que toutes les méthodologies et outils, dont les modèles applicables à l'échelle de la parcelle, reposent sur des démarches de type Tier3, au sens des lignes directrices pour les inventaires nationaux, du fait de l'utilisation de modèles de processus. Parmi ces derniers, plus de la moitié (9 sur 11) ne sont pas encore certifiés. Cette observation peut s'expliquer par le fait que les méthodologies incluant des modèles de processus sont souvent en développement, notamment en ce qui concerne les interfaces utilisateurs.

La dernière méthodologie approuvée par VCS est prometteuse quant à la prise en compte du stock de carbone du sol et prévoit un protocole supplémentaire encadrant le choix des modèles pour l'établissement du bilan GES selon l'approche la plus précise « Quantification approach 1 ». Il s'agit de la méthodologie VM0042 « Methodology for Improved Agricultural Land Management » valable à l'échelle internationale. L'entreprise Indigo Ag Inc. très présente aux Etats-Unis a participé au développement de cette méthodologie et l'utilise pour la certification de ses projets, mais la méthodologie de calcul choisie n'est pas connue ce qui limite la transparence de la démarche. De manière générale les méthodologies de certification de crédit carbone se développent rapidement à l'international grâce à une forte expansion du marché de carbone volontaire.

En annexe VI- Annexes fiches méthodologies.

20 fiches détaillées correspondant à ces méthodologies, outils et données mobilisables sont disponibles en fin de document avec leurs descriptions et usages, des informations générales (ex. échelle spatio-temporelle, GES concernés etc.), des données d'entrées et de sorties ainsi que des bases de données sous-jacentes lorsqu'elles s'appliquent. Les calculs n'y sont pas toujours détaillés pour plus de clarté mais sont disponibles vers les liens cités.

3.2. Développements réalisés et en cours dans le contexte français

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux méthodologies, outils et données mobilisables pour l'évaluation du bilan GES en grande culture avec une attention particulière pour le stockage de carbone dans le sol. En effet, une étude nationale¹ conduite par INRAE a récemment mis en évidence le potentiel (31 Mt eqCO_2 de stockage de C dans les sols additionnel par an, en moyenne pendant 30 ans) que représenterait l'adoption de nouvelles pratiques agricoles à utilisation constante des terres en France. Les principales mesures identifiées en terme de potentiel concernent les grandes cultures (86 % du potentiel de stockage additionnel), avec le développement des cultures intermédiaires, l'accroissement de la place des prairies temporaires dans les successions de cultures et l'agroforesterie intra-parcellaire.

Ainsi, un premier tableau de synthèse présente les avantages, les inconvénients, le degré de maturité et les coûts de mise en œuvre lorsque cela est possible, des méthodologies prometteuses ou déjà labélisées bas-carbone sur le périmètre des grandes cultures (tableau 2). Un second tableau de synthèse présente les outils dont modèles et données mobilisables pouvant nourrir une Méthode LBC (tableau 3).

¹ Sylvain Pellerin et Laure Bamière (pilotes scientifiques), Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Théron, Valérie Viaud, Régis Gâteau, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, 2019.

Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114p.

Tableau 2 : synthèse des avantages, inconvénients, degré de maturité et coûts de mise en œuvre des méthodologies prometteuses ou déjà labélisées bas-carbone sur le périmètre des grandes cultures

Méthodologies de mesure du C du sol	Principaux avantages	Principaux inconvénients	Cas d'applicabilité (Echelle/Culture/Type de sol)	Coût (hors temps humain de mise en œuvre)	Niveau de maturité/exemples d'application
<p>Démarche ABC'Terre avec l'outil SIMEOS-AMG (http://www.agro-transfert.org/abcterre)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • permet d'intégrer un bilan C des sols et un bilan GES des systèmes de culture du territoire dans un PCAET (Plan Climat Air Energie Territorial) en tenant compte finement des pratiques culturales, des types de sols de chaque système de culture, des enjeux agro-environnementaux du territoire. • se base sur la mobilisation des acteurs agricoles du territoire pour construire avec eux le plan d'actions • permet une affectation fine des systèmes de culture (rotation x pratiques culturales) aux types de sol du territoire dans lesquels ils sont implantés (les Unités Typologiques de Sol). Ces UTS se répartissent dans une ou plusieurs Unités Cartographiques de Sol (UCS) qui sont localisables sur le territoire. • se base sur le modèle AMG (Andriulo et al. 1999), simple et robuste, qui est validé pour une très large gamme de cultures, de couverts, de types de sols et de climats, couvrant le territoire de la France métropolitaine et au-delà. La méthodologie a donc un bon potentiel de prédiction de l'évolution du C org du sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions juridiques d'accès à certaines données d'entrée (issues des bases de données) encore à l'étude • Sensibilité à la détermination du C initial et du ratio Cstable / Ctotal • Méthodologie qui nécessite le recours à l'expertise de terrain pour reconstituer les pratiques culturales <p>Pas de caractérisation directe des biomasses des cultures intermédiaires</p> <p>Incertitudes fortes en cas d'application sur des systèmes de culture génériques, incertitudes réduites lorsque le modèle est paramétré par des données sur les parcelles de l'exploitation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle d'application : le territoire • Grandes cultures (pas de simulations via SIMEOS -AMG des évolutions du C pour les prairies permanentes, des prairies temporaires de longue durée, > 3 ans, des haies ou de l'agroforesterie) <ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte des stocks de C sous prairies permanentes (installées de longue date) de manière forfaitaire • Echelle de calcul : "système de culture reconstitué par type de sol" (= combinaison « Système de culture x Type de sol x Teneur en Corg ») dans chaque UCS • Paramétrisation encore nécessaire pour les sols très riches en MO, les sols hydromorphes 	<ul style="list-style-type: none"> • Logiciel avec licence payante (plusieurs centaines d'euros par an) • Formation payante à la mise en œuvre de la démarche (max. 500€ les 2 jours) • Différents niveaux d'accompagnement possibles par Agro-Transfert. 	<ul style="list-style-type: none"> • Actuellement testée sur cinq territoires expérimentaux dans le cadre du projet ABC'Terre-2A (3 en Hauts-de-France, 1 en Alsace et 1 en Nouvelle-Aquitaine pour tester l'application de la méthodologie à différents contextes pédoclimatiques) : http://www.agro-transfert.org/abcterre/publications-abcterre/ • Une adaptation d'ABC'Terre a été réalisée dans un territoire du Gers par le bureau d'étude SolAgro pour tester l'impact sur le stockage C des sols de différents projets territoriaux à l'étude (bioéconomie). Des prospectus sont en cours.

	<p>dans différents scénarios (climat, sol, pratiques) à long terme (30 ans).</p> <ul style="list-style-type: none"> • existence de guides et mise en place de processus pour faciliter et automatiser les futures applications de la démarche et pour optimiser son appropriation par les acteurs du territoire (utilisateurs de la méthodologie, agriculteurs, collectivités...) 				
<p>Plateforme MAELIA (http://maelia-platform.inra.fr/)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Chaque parcelle et chaque exploitation d'un territoire est représenté et simulé suivant ses spécificités • Simulations situations actuelles et futures en dynamique au pas de temps journalier et représentation de la dynamique spatiotemporelle des opérations techniques • Interactions eau, N, C journalier et interannuel au fil des couverts x pratique x années • Couplage avec des outils d'inventaires (mes parcelles) pour mobiliser les informations directement dans la parcelle • <p>Modèle Agroforesterie en cours de développement (Yield SAFE)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition des données sur les stratégies (règles de décision) de conduite des cultures • Besoin de paramétrage des cultures spécifiques • Interfaçage à adapter au besoin pour opérationnaliser 	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle du "territoire" : de l'échelle fine de l'exploitation à plusieurs milliers de km² • Grandes cultures, prairies, module de dynamique de troupeaux et agroforesterie en construction • Tous types de sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Logiciel libre • Formation gratuite pour sa mise en œuvre (7 à 15 jours) 	<ul style="list-style-type: none"> • Suivant les données disponibles, l'application de MAELIA sur un terrain d'étude peut prendre d'une à quelques semaines. Elle a été utilisée en recherche, recherche-action, en R&D et des discussions sont en cours pour permettre son utilisation par le développement agricole (CRAGE) et pour la conception de politiques agri-environnementales (Suisse)

	<ul style="list-style-type: none"> • Impact du climat sur la dynamique spatio-temporelle • Possibilité de construire un indicateur de la variabilité du stock de carbone sur quelques dizaines d'années 				
<p>Méthode CarbonAgri avec l'outil CAP'2ER® (https://cap2er.fr/Cap2er/)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Volet C du sol modulable : en attente des travaux des projets CarboCage, 4p1000, EFESE et CarSolEl pour intégrer davantage de pratiques et de facteurs associés • Prise en compte de la perte d'azote lors du déstockage de carbone (équation du GIEC, 2006) 	<ul style="list-style-type: none"> • Le volet C du sol est peu développé dans la méthode • Une liste de pratique est listée avec des facteurs de stockage additionnels : conversion culture vers prairie permanente, conversion prairie permanente vers culture, allongement de la durée des prairies temporaires, plantation des haies. 	<p>Plusieurs échelles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'échelle de l'exploitation, • L'échelle des ateliers animaux : les troupeaux et les surfaces qu'ils utilisent (surface fourragère et surface en céréales autoconsommées), • L'échelle de l'atelier végétal : surfaces de l'exploitation où les cultures récoltées sont vendues. 	<ul style="list-style-type: none"> • La méthode CARBON AGRI s'appuie sur l'utilisation de l'outil certifié CAP'2ER® de niveau 2, accessible sous licence (~35€ par diagnostic) • Des modalités d'accompagnement ont été mises en place via l'association France CARBON AGRI (https://www.france-carbon-agri.fr/) 	<p>Méthode labélisée Bas-carbone</p>
<p>Méthodologie basée sur le modèle SAFY-CO2</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation indépendante de la biomasse des repousses/cultures intermédiaires et de la biomasse des cultures principales à l'aide de données satellitaires (Sentinel 2) • Calcule la variation de stocks de C entre deux périodes en lien avec le changement de pratique 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence initiale d'un module sol représentant l'évolution de la MO dans le modèle -> incertitudes plus fortes dans l'estimation des bilans C à moyen terme. Couplage en cours avec le modèle AMG. • Données complémentaires à obtenir sur les pratiques (exportation des pailles, fertilisation organique) • Données satellitaires limitées par la couverture nuageuse (utilisation de données radar en cours de développement) 	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle régionale accessible (parcelle, exploitation, région) • Grande culture : paramétré pour le blé, le maïs, le tournesol et le colza • Tous types de sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût lié au stockage des données et traitement des données 	<ul style="list-style-type: none"> • Projet Naturellement Popcorn (en lien avec l'entreprise Nataïs) qui vise au paiement des agriculteurs du réseau mettant en place des couverts intermédiaires. A terme, l'utilisation du satellite permettrait d'avoir une rémunération proportionnelle à la biomasse des couverts implantés et donc proportionnel au stockage de carbone. • Projet H2020 NIVA « New IACS Vision in Action » : développement d'indicateurs agri-environnementaux calculables au moyen de la télédétection et qui pourront être utilisés dans le cadre de la future PAC. Un focus est mis sur trois indicateurs dans le cadre de ce projet: bilan carbone, risque de lixiviation des nitrates et biodiversité. <p>hal-03190579, version 1</p>

Tableau 3 : synthèse des avantages, inconvénients, degré de maturité et coûts de mise en œuvre d'outils ou bases de données permettant d'améliorer la caractérisation des sols dans une méthode sur le périmètre des grandes cultures

Outils dont modèles et données mobilisables pouvant nourrir une méthode	Principaux avantages	Principaux inconvénients	Cas d'applicabilité (Echelle/Culture/Type de sol)	Coût	Niveau de maturité/exemples d'application
Analyses thermiques du C des sols à l'aide de l'outil Rock-Eval®	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'évaluer la stabilité biogéochimique de la matière organique des sols et de réduire l'erreur liée à l'initialisation des stocks de C (Cs/CO) dans AMG • Mesure du C organique et C inorganique sur un seul échantillon • Pourrait être implémenté de manière simple et assez rapide dans les applications à l'échelle territoriale (ex. MAELIA/ABC Terre), notamment via la réalisation d'une carte nationale des stocks de C stable à l'échelle du siècle (travail en cours en lien avec le GIS Sol). 	<ul style="list-style-type: none"> • Instrument de recherche (pas de bureau d'étude ou d'analyses équipé en France pour réaliser ces mesures en série ; en cours de développement par Vinci Technologies et l'IFPEN) • Pas encore validé pour d'autres modèles (sera réalisé avec d'autres modèles de dynamique du C du sol (Roth-C, éventuellement Century) dans le cadre du projet ANR StoreSoilC.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle fine, sur site • Tous types de sol (à consolider, incertitudes à évaluer sur certains sols riches en métaux ou carbonates) 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de la machine de l'ordre de 250 000 euros. Attente de la mise en place d'un modèle économique permettant l'intéressement de laboratoires d'analyses 	<ul style="list-style-type: none"> • Opérationnel avec le modèle AMG
Téledétection du C organique du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Avec la téledétection on peut faire une stratification de l'espace, estimation directe avec mise à jour, cartes avec incertitudes, adaptation des méthodologies selon la région. • Spatialisation de l'occupation du sol : l'historique peut être restitué 	<ul style="list-style-type: none"> • Conflit entre l'intérêt des sols couverts et la meilleure précision des mesures quand le sol est nu • Nécessité de jeux de données de calibration 	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle variable • Tous types de sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Le coût des analyses de sol pour valider les cartes de mise à jour 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles spectraux pour la téledétection du C org du sol : Travail sur la plaine de Versailles (vaste de 221 km²) • Téledétection satellitaire (Europe) : peu de travaux antérieurs jusqu'à Sentinel-2.

	<ul style="list-style-type: none"> • Peut constituer une solution pour recueillir l'information pour les entrées d'autres modèles • Déployable sur de vastes territoires régionaux tout en permettant de restituer une variabilité intra-parcellaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures ne peuvent concerner que les premiers millimètres de sols nus, et doivent être associées à une bonne connaissance des pratiques (ex : travail du sol ayant un impact sur la redistribution du carbone) 			Travaux sur Sentinel-2, modèles issus de ce satellite ; on obtient des modèles prédictifs avec un indice RPD moyen (Ratio of Performance to Deviation)
Données sols disponibles (www.gissol.fr)	<p>Plusieurs programmes avec des données disponibles :</p> <p>Programme RMQS « Réseau de mesure de la qualité des sols »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Financements et exploitation publics, coordonnés par l'INRAE • Informations sur les pratiques agricoles sur chacun des points • Analyses fiables et robustes <p>Programme BDAT « Base de Données des Analyses de Terres » pour capitaliser les analyses de sols réalisés pour les agriculteurs en France</p> <p>Programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols) capitalisant les relevés pédologiques réalisés en France et des propriétés associées</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il est compliqué d'ouvrir les données de sol et pratiques : Les données sont de plus en plus géo référencées et peuvent être considérées comme des données personnelles les rendant juridiquement « propriété privée », nécessitant de passer par des conventions pour une application en recherche. • Analyses BDAT antérieures à 2014 mais une nouvelle convention pour la collecte des données est en cours de négociation • ¾ des données IGCS sont antérieures à l'année 2000 (il n'y a pas d'obsolescence des données sol mais les données d'activité biologiques telles que le pH ou la matière organique varient au cours du temps) 	<ul style="list-style-type: none"> • Echelle fine, mesures directes 	Financements publics	Les bases de données sol sont utilisées dans le cadre des inventaires nationaux, et du calibrage des modèles

La diversité des approches applicables en grandes cultures est encourageante mais laisse entrevoir une problématique récurrente qui est le manque d'informations sur l'impact de la précision des données d'entrées sur les données calculées/estimées. Il est important de disposer de méthodologies de calcul précises pour une fiabilité de l'évaluation du stock de carbone dans le sol en particulier dans le cadre de la labélisation Bas-Carbone. En effet, la valorisation économique du carbone stocké est nécessaire et contribue à l'incitation pour atteindre une plus grande partie du potentiel de stockage en grandes cultures. Une valorisation du stockage à 55 €/t eqCO_2 (le niveau initialement prévu de la contribution climat-énergie pour 2019) permettrait d'aligner intérêt des agriculteurs à changer leurs pratiques et objectifs publics à hauteur d'environ la moitié du potentiel (soit 14,7 Mt eqCO_2) pour un coût relativement faible en regard du budget de la PAC en France (159 M €/an, pour un budget PAC en France de 9,1 Mrd € pour la période 2015-2020). Le développement des projets de réduction des émissions dans le cadre du LBC pourrait mobiliser le stockage et la conservation des stocks de carbone, ce qui peut constituer une opportunité économique pour les agriculteurs à condition d'avoir un retour sur investissement entre la mise en place de leviers de réduction d'émissions, le coût de la mesure des stocks de carbone et des émissions et l'obtention de crédits carbone.

Toutefois, les méthodes LBC permettant de suivre et de vérifier le stockage de carbone dans les sols agricoles sont encore en développement. Les options disponibles, leurs avantages et leurs inconvénients et leur compatibilité avec le label bas-carbone sont abordés dans la troisième partie de notre analyse.

4. Approches et recommandations pour l'estimation et la certification de la variation du stock de carbone organique du sol

Plusieurs éléments sont à prendre en compte dans la construction de modèles d'affaires viables pour des projets de réduction d'émission. Nous présentons dans cette partie les possibilités pour déterminer le potentiel de stockage, les différentes options pour l'évaluation et le suivi du bilan de carbone organique des sols, les leçons tirées d'une analyse de sensibilité du modèle AMG aux données d'entrées et les principes du label bas-carbone à considérer pour la mise en place d'un projet de réduction des émissions en vue de l'obtention de crédits carbone. Le choix du modèle AMG s'explique par sa simplicité d'utilisation et le fait qu'il a été validé pour une très large gamme de cultures, de couverts, de types de sols et de climats, couvrant le territoire de la France métropolitaine (Clivot et al., 2019).

4.1. Analyse préliminaire du potentiel de stockage à l'échelle de l'exploitation

Lors de la conception d'un projet visant à stocker du carbone dans des sols agricoles, une première évaluation des pratiques à mettre en œuvre, de leur potentiel de stockage de carbone du sol et de leur coût peut être réalisée grâce à la couverture nationale de l'étude 4 pour 1000 (INRAE, 2019). Le stockage de carbone a été évalué dans le cadre de cette étude, pour différentes pratiques en grandes cultures et prairies permanentes, grâce aux modèles STICS et PASIM. Le méta-modèle du projet CarSolE², construit à partir de la base de données regroupant les simulations réalisées par cette étude sur la France entière, permettra d'accéder à des références pour les principales pratiques stockantes et pour les principaux systèmes de culture et d'élevage en France métropolitaine. Cette première étape est assez simple d'utilisation, grâce à des variables d'entrée en nombre restreint et pourrait permettre d'obtenir un ordre de grandeur à l'échelle de l'exploitation. Toutefois, ce méta-modèle ne permet pas de représenter toute la diversité des combinaisons entre systèmes de culture, pratiques stockantes, sols et climats. Il ne peut donc pas fournir une estimation du stockage de carbone organique dans le sol suffisamment précise pour une exploitation, ou pour une parcelle donnée. En revanche, il pourrait permettre d'orienter les choix de pratiques stockantes et d'évaluer *ex-ante* le niveau de stockage cible d'un projet.

²https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjCibXt0ZfqAhUvx4UKHWZMBdoQFjAAegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.agro-transfert-rt.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F01%2F12_Colloque_SoleBIOM-AMG_Atelier1_Resume_CarSolE1.pdf&usq=AOvVaw3pnjqFVhDRPzqOHZJH3h

Une première version du méta-modèle et de son interface utilisateur est en cours de test. Après validation, cet outil permettra d'orienter le choix des leviers à mettre en place au sein d'une exploitation et d'avoir une première idée du stockage de carbone organique escompté.

4.2. Options pour l'évaluation et le suivi du bilan de carbone organique d'un sol de grandes cultures

Il faut tout d'abord rappeler qu'il n'est en pratique pas possible de déterminer de manière directe la variation du stock de carbone organique du sol d'une parcelle quelques années après l'introduction de pratiques stockantes. Sur une série de sites européens de grandes cultures, Schrumppf et al. (2011) ont en effet montré que la différence minimale détectable atteignait $1,05 \pm 0,28$ tC ha⁻¹ pour un effort d'échantillonnage très important (100 échantillons carottés jusqu'à 50 cm, avec mesure de la densité apparente et de la teneur en carbone de plusieurs horizons par échantillon). Si l'on considère la cible d'un stockage de carbone dans le sol de 0,4% par an pour un stock initial de 50 tC/ha, la différence de stock au bout de 4 ans atteint seulement 0,8 tC/ha. La détection de ce stockage n'interviendrait qu'au bout de 6 ans, en supposant un effort de mesure (100 échantillons par parcelle) qui est en réalité impraticable chez un agriculteur. Avec un effort de mesure encore important (10 échantillons par parcelle), un stockage significatif ne serait détecté qu'au bout de 24 ans ce qui ne permettrait pas de financer des projets.

A ce jour, quelques méthodologies internationales ont été validées par des acteurs privés, comme la méthodologie (SALM) qui a été approuvée par VCS³ (Verified Carbon Standard) et qui encadre l'évaluation et le suivi du bilan carbone pour les projets adoptant des pratiques stockantes tels que l'application d'amendements organiques, l'introduction de plantes de couverture (ex. cultures intermédiaires), la plantation d'arbres, etc. Cette méthodologie repose sur une approche théorique de modélisation, puisqu'elle estime le différentiel entre les stocks de carbone du sol à l'équilibre avec et sans introduction de pratiques stockantes. Le modèle RothC (simulation de la dynamique du carbone dans le sol) est utilisé à cet effet. Or, il y a plusieurs approximations dans cette méthodologie : le sol d'une parcelle n'est pas nécessairement à l'équilibre et la valeur initiale du stock de carbone peut être sensiblement différente de l'hypothèse d'équilibre faite par le modèle ; après introduction d'une nouvelle pratique stockante, il faut 20 ans ou plus pour atteindre un nouvel équilibre et la dynamique d'accumulation du carbone au cours de cette période n'est pas linéaire (ce qui est négligé dans la méthodologie) ; l'apport au sol de la pratique stockante doit enfin être estimé, mais la méthodologie est peu précise sur ce point. Une autre raison pour ne pas appliquer directement une méthodologie de bilan de carbone du sol développée dans une autre région du monde (comme en Australie ou en Alberta) concerne l'absence de paramétrisation pour les conditions pédoclimatiques françaises. Finalement, nous proposons plusieurs options complémentaires et qui pourraient être utilisées dans le développement d'une méthode LBC GC.

4.2.1. Option 1 : Simeos-AMG avec une extension ABCTerre pour le bilan GES complet

Le modèle AMG (Andriulo et al. 1999) est un modèle semi-mécaniste simple, avec trois compartiments. Le premier compartiment, de carbone organique frais entrant, provient des résidus et produits résiduels organiques (PRO). Ensuite, deux compartiments de carbone organique du sol se distinguent : l'un dit « actif » tandis que l'autre est considéré comme « stable » sur 100 ans au moins. Trois paramètres majeurs sont à considérer : le coefficient d'humification des résidus ou k_1 , le coefficient de minéralisation annuel du carbone organique actif du sol ou k_2 et le coefficient de partition entre C actif et C stable. Pour ce dernier, il est possible d'utiliser une valeur par défaut ou de l'estimer à partir d'une analyse thermique Rock-Eval^{®4} (Barré et al., 2020).

³ <http://verra.org/wp-content/uploads/2018/03/VM0017-SALM-Methodology-v1.0.pdf>

⁴ https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/07/EGS_2020_27_Barre_305-320.pdf

Tableau 4 données en entrée, en sortie et bases de données pour le modèle AMG

En entrée	En sortie	Bases de données
<p>Carbone organique initial (0-30 cm)</p> <p>Données sol (argiles, calcaire, pH, C/N)</p> <p>Données pratiques agricoles, rotations culturales, types de couverts, rendement, amendements organiques</p> <p>Données irrigation, climat local</p>	<p>Stock de carbone organique du sol et évolution (+30ans)</p> <p>Distribution du carbone organique dans le profil de sol (0-30cm)</p> <p>Flux de biomasse végétale retourné au sol et carbone organique humifié associé (moyenne.ha⁻¹.an⁻¹)</p>	<p>Base de données de calibration compilant des essais longues durée françaises (sol, climat, cultures et systèmes de culture)</p> <p>Caractéristiques allométriques des cultures permettant notamment de déterminer les apports racinaires</p>

Le modèle AMG, dérivé du modèle de Hénin-Dupuis, permet de simuler l'évolution du stock de carbone organique du sol avec une erreur relative faible $RRMSE=5.3\%$ et comparable à l'erreur des données mesurées (CV médian = 4.3% pour 386 mesures de stock avec 4 répétitions en moyenne, profondeur 20 à 30 cm : médiane = 28 cm, Clivot et al., 2019) sur des sites expérimentaux de long terme en France. De plus, les améliorations apportées au modèle (AMGv2) ont permis de réduire l'erreur quadratique moyenne pour le stock de carbone organique du sol (RMSE) à 2,6 tC/ha, une valeur un peu plus faible que celle de la version initiale (AMGv1 RMSE = 3.2 t C. ha⁻¹, Clivot et al., 2019). Il a également été montré qu'une initialisation du modèle AMG à partir de l'outil Rock'Eval© (détermination de la stabilité de la matière organique du sol) avec un modèle statistique permet d'améliorer les capacités de prédiction du modèle (Cécillon et al. 2018). Comme la plupart des modèles de dynamique de carbone, le modèle AMG n'est toutefois pas adapté aux sols organiques (andosols, anciennes tourbières, etc.).

Ce modèle déterministe ayant été calibré sur une base de données assez représentative des conditions pédoclimatiques des grandes cultures en France et ayant une erreur de prédiction du stock de carbone du sol comparable à l'erreur expérimentale, il peut être utilisé pour prédire l'évolution du stock en fonction des pratiques à condition toutefois de pouvoir renseigner avec une précision suffisante l'ensemble des variables d'entrée du modèle. Une étude de la sensibilité du modèle aux incertitudes des variables d'entrée est présentée en partie 3 afin d'évaluer l'incertitude résultante sur l'évolution du stock de carbone du sol à pratiques constantes, d'une part, et sur le différentiel de stock avec et sans pratique stockante, d'autre part.

A l'échelle du territoire, la méthodologie ABC'Terre permet d'évaluer l'évolution des stocks de carbone organique des sols (grâce à l'outil Simeos-AMG) ainsi que les émissions d'autres gaz à effet de serre à partir des facteurs d'émission du GIEC et d'autres bases de données (Agribalyse, EcoInvent). Dans la version actuelle, Simeos-AMG fonctionne avec des rotations types de 3 à 6 ans répétées dans le temps, ce qui correspond à une contrainte informatique de l'outil Simeos, qui n'est pas lié au modèle AMG en lui-même et cette contrainte pourrait donc être levée. Il peut y avoir une différence entre les pratiques envisagées en début de projet et celles réellement mises en œuvre. Cela est valable pour toutes les pratiques (la succession de cultures, l'introduction de cultures intermédiaires (CI), les apports de produits résiduels organiques (PRO), etc...). Le cas des CI est particulier car il faut renseigner dans le modèle AMG leur production, celle-ci déterminant l'apport de carbone organique au sol. Une vérification de la présence de ces couverts et une estimation de leur production, par exemple par télédétection satellitaire est donc souhaitable.

On pourrait recommander dès maintenant l'utilisation du modèle AMG, avec une adaptation souhaitable de l'outil SIMEOS à des cas plus diversifiés de rotations. De plus, une validation par télédétection de la présence de cultures intermédiaires et de leur développement permettrait de sécuriser la méthodologie, en évitant de comptabiliser des cultures intermédiaires ayant présenté des défauts de levée ou de croissance.

4.2.2. Option 2 : SAFY-CO2 et suivi des couverts par télédétection

SAFY-CO2 (Pique et al., 2020) est un modèle agro-météorologique assimilant des données optiques de télédétection (cartes d'indice foliaire, LAI) pour estimer la production végétale et les composantes du bilan carbone. Il utilise l'approche de Monteith pour calculer la productivité primaire brute GPP. La respiration autotrophique (Ra), i.e. par les plantes, est séparée en respiration d'entretien et de croissance. La production primaire nette (NPP, qui est la différence entre la GPP et Ra) est ensuite répartie entre les parties aériennes et racinaires. La biomasse aérienne est calculée à partir de la teneur en carbone des parties aériennes et convertie en indice foliaire et rendement à la fin de la période de croissance grâce à un indice de récolte (HI). La respiration du sol (respiration hétérotrophe, Rh) est estimée dans cette version en utilisant une simple fonction de réponse à la température (fonction exponentielle de type Q10). Le bilan de carbone (NEE) est calculé à un intervalle de temps quotidien en tenant compte de la GPP, de Ra et de Rh, puis agrégé à une échelle annuelle (année de culture) en tenant compte de la quantité de carbone exportée à la récolte (rendement).

Tableau 5 : données en entrée, en sortie et bases de données pour le modèle SAFY-CO2 (<https://www.cesbio.cnrs.fr/la-recherche/activites/modeliser-codes-et-modelisation/liste-et-descriptif-des-modeles/modspa/>)

En entrée	En sortie	Bases de données
<p>Cartes de LAI et de couverture du sol</p> <p>Rayonnement global, température (et pluviométrie pour la version couplée à un module eau : SAFYE-CO2)</p> <p>Informations sur l'exportation ou non de pailles, la quantité de C fournie par la fertilisation organique.</p>	<p>Photosynthèse, respiration autotrophique et hétérotrophe, biomasse, LAI, NEE, rendement, Bilan C (évaporation et transpiration lorsqu'il est couplé à un module d'eau) dont l'évolution du stock de carbone du sol</p>	<p>Sentinel 2 pour l'assimilation du LAI</p> <p>SAFRAN data (Météo France), ERA5 (ECMWF)</p> <p>Global Soil Map</p> <p>RPG</p> <p>Cartes de couverture du sol issues de la télédétection</p>

SAFY-CO2 a été développé et calibré à partir de données d'échanges de CO₂ mesurées par la méthode des fluctuations turbulentes (tours à flux) entre l'atmosphère et des parcelles de grandes cultures. Dans sa version initiale, il ne comprend pas de modèle de décomposition de la matière organique dans le sol, ce qui constitue une limitation importante. En effet, à même température, Rh peut varier selon le stock initial de carbone du sol, le type de sol et le bilan hydrique. En revanche, l'assimilation de données satellitaires permet d'avoir une approche diagnostique du bilan de carbone semaine après semaine. En particulier, le différentiel de stock de carbone avec et sans pratiques stockantes peut être estimé au cours du temps, en tenant compte de la croissance observée par satellite (Sentinel 2, résolution de 10 m environ 2 fois par semaine par ciel clair) des cultures principales et intermédiaires. La prédiction du bilan de carbone dépend donc largement de données indépendantes issues de la télédétection qui seront de plus en plus facilement accessibles dans un proche avenir. Ainsi, un programme COPERNICUS devrait fournir fin 2020 un produit Sentinel 2 en accès libre⁵ concernant la dynamique de l'indice foliaire des surfaces agricoles, ainsi que la nature des cultures. De plus, les activités des agriculteurs sont signalées via le système d'identification des parcelles de terrain (LPIS) montrant les champs et leurs marges dans le cadre du SIGC de la politique agricole commune⁶. Le système intégré d'administration et de contrôle (IACS) peut également fournir des données précieuses sur les systèmes de culture et les pratiques de gestion et ce au niveau des parcelles via le système d'identification des parcelles agricoles⁷. Cependant, à des fins de surveillance du carbone du sol, il existe des lacunes dans les déclarations de la PAC, y compris la présence ou non de cultures de couverture et la gestion des résidus de cultures et des engrais organiques.

La calibration du modèle pour les différentes cultures (grandes cultures, cultures intermédiaires) passe par des campagnes de terrain pour estimer notamment les relations entre biomasse aérienne, surface foliaire et résidus de récolte. L'erreur quadratique moyenne

⁵ Télédétection de la phénologie, NDVI, faPAR, fcover (voir les produits de phénologie de COPERNICUS, à paraître en 2020 pour l'UE)

⁶ https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-politiques/politique-agricole-commune/plafond-de-financement/contrôles-et-transparence/gestion-des-paiements_fr

⁷ https://www.eca.europa.eu/Lists/News/NEWS1610_25/SR_EN.pdf

du modèle (RMSE) pour le bilan de carbone du sol atteint 0,77 tC/ha⁸. L'analyse de la propagation des incertitudes dans ce modèle est en cours et sera disponible à partir du 3^{ème} trimestre 2020.

La méthodologie SAFY-CO2 facilite les simulations à l'échelle régionale, puisqu'il est possible de simuler le bilan de carbone d'une petite région agricole, à condition de renseigner les rendements, le devenir des résidus de récolte et la fertilisation organique pour chaque parcelle. Ces simulations à l'échelle régionale sont développées dans le projet Horizon 2020 NIVA qui préfigure les outils de suivi qui devraient être mis en œuvre dans le cadre de la modernisation de la PAC.

Cette seconde option est intéressante pour l'avenir et devrait permettre à minima d'estimer la levée et la croissance des C.I. en complément de l'option 1. Toutefois, elle est incomplète du fait de l'absence d'un modèle de décomposition de la matière organique du sol.

4.2.3. Option 3 : Couplage SAFY-CO₂ – AMG, spatialisation du stock de carbone du sol en surface

Du fait de la complémentarité entre AMG et SAFY-CO2, le couplage de ces deux modèles a été réalisé récemment dans le cadre du projet EIT KIC Climat '*Soil carbon farming*' et la version couplée est en cours d'évaluation. Cette nouvelle version pourrait également bénéficier à terme des développements informatiques réalisés par SIMEOS-AMG et par ABC'Terre, ainsi que de la chaîne de calcul des images satellitaires développée par SAFY-CO2. A priori, la version couplée pourrait être appliquée à des types de sols différents sans nécessité de re-calibration de la respiration hétérotrophe pour chaque type de sol.

Enfin, également, dans le cadre de ce projet de la KIC Climat, différentes méthodes d'initialisation du stock de carbone du sol et des propriétés des sols ont été testées (Global Soil Map, Soil Grids-ISRIC). Les incertitudes sur les paramètres des sols (teneurs en C organique, argile et CaCO₃, pH et C/N, cf. tableau 6) seraient assez élevées (RRMSE = 18-118%, médiane = 46%) si on utilisait en entrée du modèle des produits sols de "faible résolution" (ex.: SoilGrid, GSM, Lucas) en comparaison à des données de terrain mesurées. En partant des valeurs médianes par canton de la BDAT (base d'analyse des terres, GIS Sol), les résultats seraient meilleurs (RRMSE = 7-26%, médiane = 18%, avec une correction à apporter aux valeurs d'argile dans les sols calcaires car le modèle AMG utilise en entrée les teneurs en argile vraie). On peut supposer que l'incertitude sur des échantillons de sols analysés est moindre (de l'ordre de 10%, selon la représentativité de la parcelle et la méthode d'échantillonnage), le coefficient de variation entre répétitions d'un même essai étant par exemple pour le stock de C organique de 4.3% (Clivot et al 2019). Une alternative, en cours de développement, consisterait à évaluer par télédétection les propriétés spectrales du sol nu de surface (premiers millimètres) (Sentinel 2, résolution de 10 m) afin de disposer de cartes à haute résolution permettant de spatialiser ces propriétés à une échelle infra-parcellaire, en comparaison de la détermination de propriétés de référence sur quelques échantillons portant sur l'horizon 0-30 cm. Ces travaux sont prévus dans un projet déposé à l'AAP Worldsoils de l'ESA et sont par ailleurs développés par un partenaire suisse (AgriCircle) d'un projet financé par l'EIT Climate-KIC⁹.

Cette option 3, plus complète que l'option 2, nécessite encore des mises au point, mais devrait fournir une méthodologie avancée pour les grandes cultures en vue du label bas carbone.

⁸ G. Pique, R. Fieuzal, A. Al Bitar, A. Veloso, T. Tallec, A. Brut, M. Ferlicoq, B. Zawilski, J.F., Dejoux, H. Gibrin, and E. Ceschia (2020). Estimation of daily CO2 fluxes and annual carbon budgets for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *Geoderma*, in press.

⁹ Carbon Farming: Experimenting Soil Carbon Sequestration Deployment in Farming Systems

4.3. Sensibilité du bilan de carbone estimé par le modèle AMG à la propagation des incertitudes sur les variables d'entrée et paramètres du modèle

L'erreur de prédiction des 3 options analysées précédemment dépend en grande partie de la propagation des erreurs. Cette erreur de prédiction est en cours d'analyse pour les options 2 et 3. Nous présentons ici de premiers résultats d'erreur de prédiction pour le modèle AMG. Dans tout modèle déterministe, comme AMG, l'erreur de prédiction sur les variables de sortie augmente avec l'incertitude sur les variables d'entrée et sur les paramètres. Nous analysons dans un premier temps l'incertitude relative sur le stock de carbone dans un scénario optimiste de mesure fine des variables d'entrée, puis un scénario concernant la propagation des incertitudes dans un scénario pessimiste où seules des données régionales seraient disponibles.

4.3.1. Propagation des incertitudes des variables d'entrée et des paramètres du modèle selon deux scénarios de données d'entrée (mesures fines ou données régionales)

La sensibilité du modèle AMG a été étudiée par Clivot et al. (2019) (figure 6 de Clivot et al.). Pour un scénario optimiste où les variables d'entrée sont finement mesurées (propriétés du sol, rendements, etc.), la variation au bout de 5 ans du stock de carbone d'un sol de propriétés médianes a été dérivée de cette analyse de sensibilité. Deux scénarios de données ont été contrastés : un scénario optimiste (mesures fines des variables d'entrée) et un scénario pessimiste (données régionales simulées ou interpolées, pas de mesure de terrain). Pour le scénario optimiste, le différentiel du stock de carbone organique du sol après 5 ans varie dans la moitié des cas (interquartile) dans une fourchette de $\pm 16\%$ (avec des variations extrêmes de $\pm 60\%$; IV- figures supplémentaires, figure 7). Pour le scénario pessimiste, où seules des données régionales (IV- figures supplémentaires, figure 8) seraient accessibles, ce différentiel varie dans la moitié des cas de $\pm 40\%$ (avec des variations extrêmes de $\pm 100\%$).

4.3.2. Comparaison de scénarios sans et avec pratiques stockantes (introduction de couverts intermédiaires et apports de produits organiques résiduels)

Nous avons sélectionné 12 essais sur 12 sites de la base de données de sites de longues durées (AIAL) correspondant au jeu de données de Clivot et al. (2019). Cela a permis de réduire et tenter d'équilibrer le jeu de données, même s'il est toujours un peu déséquilibré pour les teneurs en calcaire du sol (peu de sols au-delà de $200 \text{ g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$). Deux scénarios de pratiques ont été considérés : système de culture de chaque site sans pratique stockante additionnelle ; système de culture avec ajout de cultures intermédiaires et d'épandages de produits organiques résiduels (PROs, $2,5 \text{ t C/ha}$ tous les 2 ans). En considérant que seules des données régionales seraient disponibles, la sensibilité du stock de carbone du sol après 5 ans a été analysée pour chaque variable d'entrée du modèle AMGv2 pour la borne d'incertitude négative et pour la borne d'incertitude positive. Cette analyse a été réalisée pour chacun des scénarios de pratiques (Figure.2), d'une part, et pour la différence de stock de carbone avec et sans pratiques stockantes (Figure.3).



Figure 1. Analyse de sensibilité du stock final de C du sol après 5 ans pour 2 scénarios de pratiques : sans (haut) et avec (bas) cultures intermédiaires et épandages de PROs. Influence des incertitudes relatives (borne négative, borne positive) des variables d'entrées et paramètres du modèle AMGv2 sur le stock de C. Chaque boîte figure la variabilité des résultats pour les 12 sites analysés. Le stock final dépend beaucoup du stock initial (forte sensibilité à la variable SOC).

Ces données indiquent une sensibilité très élevée du stock final de carbone du sol à la valeur initiale de stock utilisée pour initialiser le modèle, une sensibilité élevée pour des données du sol comme le pH, le C/N et la fraction de carbone stable. Une sensibilité moindre est observée pour les autres variables.

En différentiel entre les deux scénarios de pratiques, la sensibilité du stockage de carbone aux variables initiales et paramètres du modèle est fortement réduite en comparaison des résultats pour chaque scénario de pratiques. En particulier, les incertitudes sur le stock initial de C (SOC) et sur la fraction de carbone stable (Stable_C) n'ont pas d'influence sur le différentiel de stockage de carbone entre scénarios de pratiques (Figure 3).

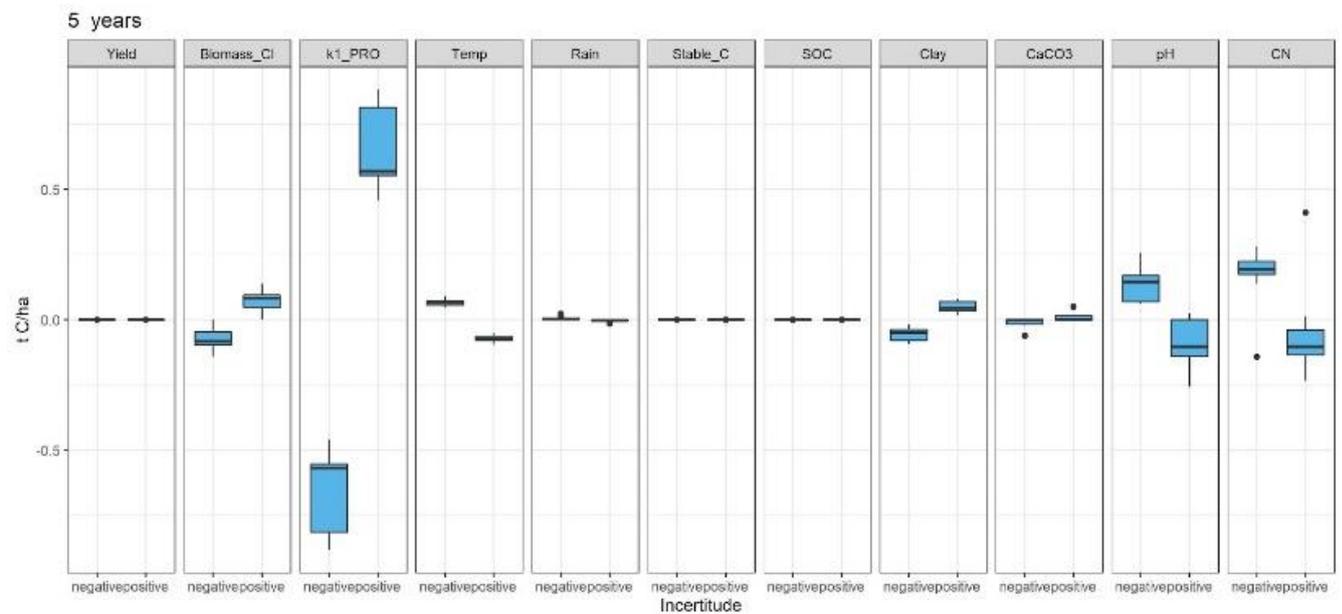


Figure 2. Analyse de sensibilité du stockage de carbone après 5 ans résultant de l'application de pratiques stockantes (C.I. et PROs, différence entre les deux scénarios de pratiques). Influence des incertitudes relatives (borne négative, borne positive) des variables d'entrées et paramètres du modèle AMGv2. Chaque boîte figure la variabilité des résultats pour les 12 sites analysés.

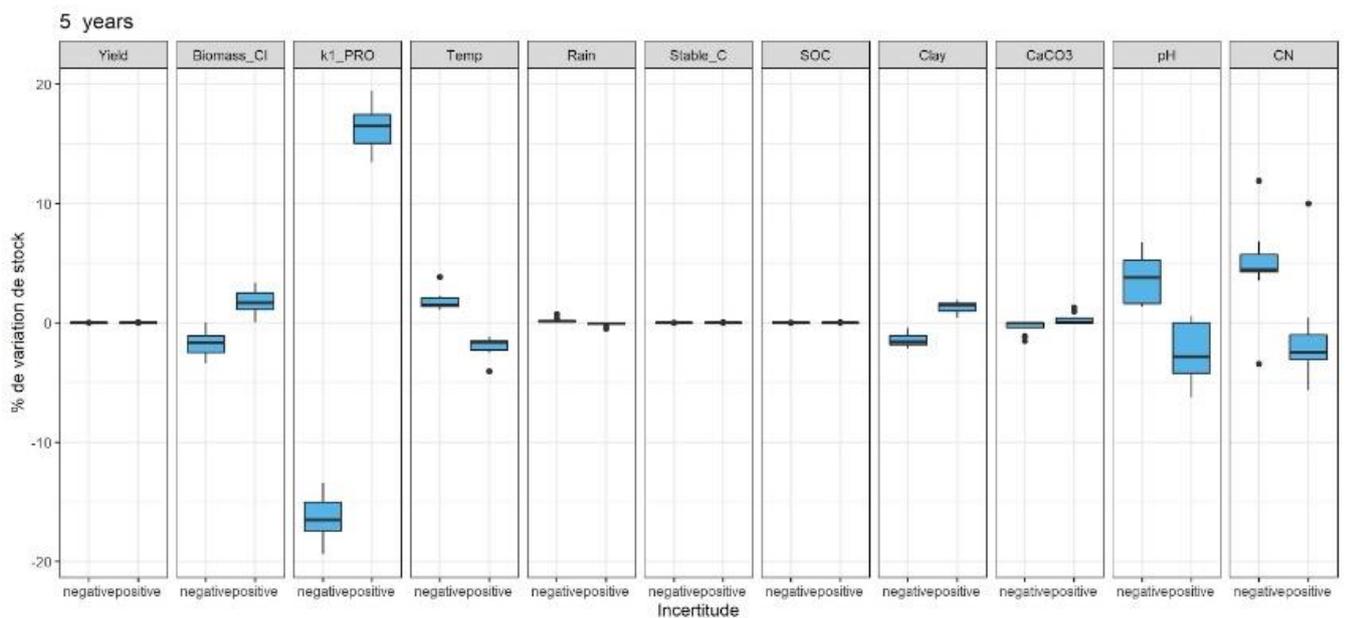


Figure 3 Résultats de la Figure 3 exprimés en % de variation du stock de C initial. Analyse de sensibilité du stockage de carbone après 5 ans résultant de l'application de pratiques stockantes (C.I. et PROs, différence entre les deux scénarios de pratiques).

Pour le stockage en différentiel des scénarios de pratiques, les effets des incertitudes sur la biomasse des cultures intermédiaires et sur le coefficient d'humification des PROs 'K1pro' sont finalement les plus importants sur les sorties du modèle (Figure 4); l'incertitude sur les rendements n'a ici pas d'influence car les rendements des cultures principales sont supposés identiques dans les deux scénarios. Mais il convient de noter que des pratiques stockantes (comme l'apport d'azote) influençant la productivité primaire des cultures principales et les rendements donneraient plus de poids aux incertitudes sur les rendements dans les deux scénarios de pratiques.

Les autres variables influentes sont celles modulant le taux de minéralisation de la MOS active (facteurs pédoclimatiques). L'influence de ces variables d'entrées pédoclimatiques (température, précipitations, argiles, CaCO₃, pH et C/N) est environ 10 fois moindre sur l'analyse en différentiel que lorsque l'analyse de sensibilité est faite sur les stocks de C en absolu.

Nous pouvons résumer les principales conclusions de cette étude avec des recommandations quant à l'acquisition des données dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6. Recommandations pour l'acquisition des données d'entrée du modèle AMGv2. A) pour minimiser l'incertitude sur le stockage de carbone résultant de pratiques stockantes (différence de stock entre scénarios de pratiques). B) pour minimiser l'incertitude sur la valeur absolue du stock de carbone après 5 ans dans chaque scénario de pratiques.

Paramètres ou variables d'entrées	A) Effet des incertitudes sur la différence de stock de C à 5 ans	A) Recommandations pour l'acquisition des données pour un différentiel de stock	B) Effet des incertitudes sur les stock de carbone en absolu à 5 ans	B) Recommandations pour l'acquisition des données pour le stock simulé en absolu
Stock de carbone initial	Faible	Données régionales avec au minimum une analyse de terre représentative de la parcelle	Elevé	Mesures fines du stock de carbone de l'horizon de surface (0-30 cm)
Fraction de C stable			Moyen (élevé à plus long terme)	
Pluviométrie			Faible	
Température	Moyen (élevé à plus long terme)	Mesures en continu à proximité du site	Faible (moyen à plus long terme)	Mesures à proximité du site ou données statistiques régionales
pH, argiles, CaCO ₃ , ratio C/N	Moyen (élevé à plus long terme)	Analyse de terre représentative à la parcelle	Moyen (élevé à plus long terme)	Analyse de terre représentative à la parcelle
Biomasse des cultures intermédiaires	Elevé	Évaluation par télédétection calibrée au sol	Faible	Évaluation par télédétection
Quantité de carbone des PRO et sa stabilité (K1_PRO)	Elevé	Mesures fines	Faible (moyen à plus long terme)	Données moyennes par type de produit

Deux études ont permis de comparer les performances d'AMGv2 pour simuler les stocks de C en absolu ou en différentiel avec des couples de traitements référence vs pratiques stockantes :

- Dans le cas des apports de PROs, le modèle AMG simule le stock de carbone avec une RMSE moyenne de 4,3 t C/ha pour les traitements avec PROs (RMSE = 2,77 t C/ha pour leurs témoins). La RMSE moyenne pour les différentiels de stocks entre traitements PROs et témoins est quant à elle plus faible et vaut 3,0 t C/ha (Levavasseur et al., 2020). On observe donc une erreur moindre sur le différentiel de stock entre deux pratiques par rapport à l'erreur sur l'estimation du stock de C en absolu.
- Pour la restitution des pailles et couverts, de nouvelles simulations avec AMGv2 d'une partie des données de Saffih Hdadi et Mary 2008 (H. Clivot, communication personnelle) montrent qu'en moyenne l'erreur du modèle est également moindre pour simuler un différentiel de stocks de C entre 2 pratiques (RMSE moyenne = 1,7 t C/ha) par rapport à l'erreur sur le stock de C (RMSE = 2,4 t C/ha pour les traitements avec restitution de pailles ou couverts ray grass, RMSE = 1,95 t C/ha pour les modalités témoins).

Dans les deux cas de figure, l'erreur du modèle (RMSE) est réduite de 30% pour une estimation d'un différentiel de stocks entre 2 pratiques plutôt que des stocks de C.

4.3.3. L'erreur sur les variations de stock pour des systèmes présentant un fort stockage de C par rapport à un système témoin

Pour des essais permettant d'initialiser le modèle avec des mesures fines sur le site et présentant un stockage de carbone moyen supérieur à 1 tC/ha, l'erreur relative (RRMSE) du modèle pour le stockage de carbone résultant des pratiques stockantes est en moyenne de 29% pour les essais avec restitutions de pailles ou couverts (H. Clivot, communication personnelle) et de 28 % pour les apports de PROs (Table 1 dans Levavasseur et al. 2020), soit une erreur d'environ 30% sur la différence de stock avec versus sans pratiques stockantes. Les pratiques stockantes simulées, en comparaison du scénario de base, dans l'analyse de sensibilité du modèle montrent une forte augmentation du stock de carbone après 5, 10, 20 et 30 ans (Figure 5). Les variations annuelles de stocks de C

atteignent en effet +0,5 à +0,8 tC/ha/an par rapport aux systèmes témoins (Figure 5). La figure 6 montre l'erreur relative du modèle (RRMSE) en comparaison de ces variations de stocks.

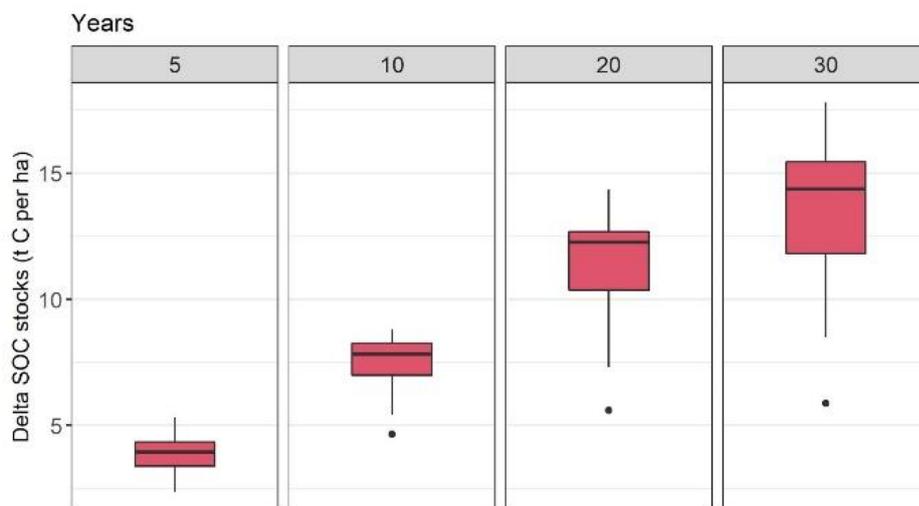


Figure 4 : Variabilité des variations de stocks simulées pour des systèmes stockants (CI + PRO 2.5 t C/ha tous les 2 ans) sur les 12 sites sélectionnés dans la base AIAL, par rapport à des témoins sans pratiques stockantes à 5, 10, 20 et 30 ans.

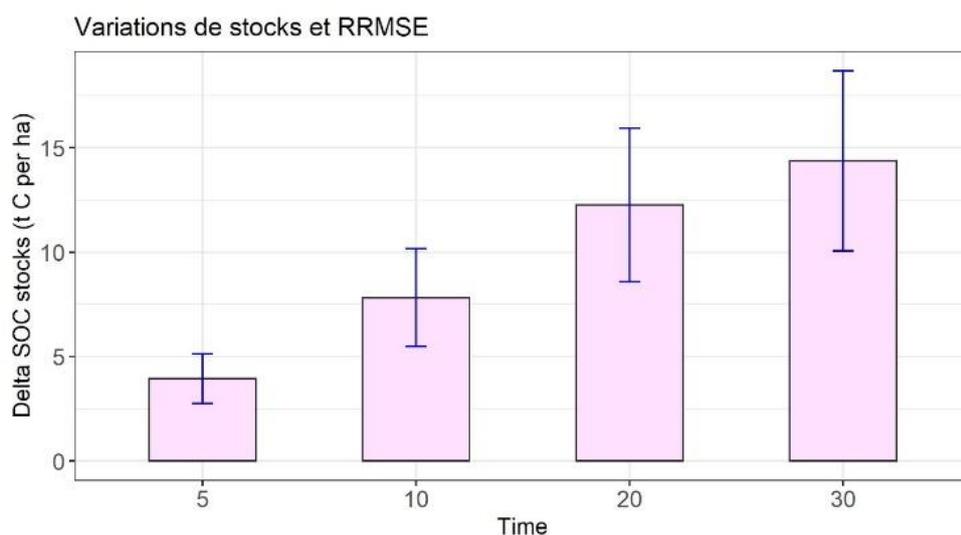


Figure 5 : Valeurs médianes des variations de stocks simulées (systèmes stockants vs. témoins). Les barres d'erreur correspondent à l'erreur relative du modèle (RRMSE = 30%) à 5, 10, 20 et 30 ans.

En conclusion, ces analyses de sensibilité et d'incertitudes débouchent sur des préconisations concernant les mesures et données à utiliser en entrée du modèle AMGv2 (tableau 6) afin de réduire l'incertitude soit sur l'évolution du stock de carbone du sol, soit sur le stockage de carbone résultant de l'application de pratiques stockantes. Dans les cas les plus favorables (pratiques permettant un fort stockage, mesures et données d'initialisation suivant ces recommandations), l'incertitude sur le stockage résultant de l'application des pratiques atteindrait environ 30%. Cette incertitude est nettement plus faible que celle sur la valeur absolue du stock de carbone pour un scénario donné de pratiques. L'utilisation d'un différentiel entre scénario de base et scénario avec pratiques stockantes permet par ailleurs d'encourager les pratiques stockantes dans l'ensemble des situations, y compris pour des agriculteurs dont les sols déstockeraient du C mais moins que la référence.

4.4. Intégration des principes du Label Bas-Carbone pour l'écriture d'une méthodologie

Pour bénéficier du Label Bas-Carbone (LBC)¹⁰, un Projet de réduction d'émissions doit se conformer à une méthode approuvée par l'Autorité - la DGEC du MTES. Le point III.B du référentiel du LBC définit les champs obligatoires d'une méthode sont détaillés dans un guide pédagogique¹¹ construit par l'4CE en partenariat avec le MTES. Toute personne physique ou morale peut proposer une méthode à l'Autorité, qui sera en charge de son approbation. A partir des résultats de l'analyse bibliographique sur les méthodologies existantes en France et à l'étranger, nous proposons des recommandations pour l'écriture d'une méthode lorsque cela est applicable :

4.4.1. Le périmètre

Le périmètre d'une méthode éclaire le type de projets auxquels elle s'applique. Il reprend :

- Les pratiques couvertes
- Les émissions liées à ces pratiques et qui sont comptabilisées (Emissions directes, indirectes, anticipées)
- La liste des GES pris en compte.
- Toute innovation permettant d'atteindre des réductions d'émissions

Une méthode ayant un large périmètre, couvrant un grand nombre de pratiques et concernant les principaux GES liés à l'activité agricole est souhaitable (CO₂, N₂O, CH₄, etc.). En effet, cela facilitera le choix de la méthode pour les porteurs de projets d'une part et d'autre part leur permettra d'identifier plus simplement les leviers qui les concernent.

4.4.2. Les pratiques et leurs combinaisons

Les résultats de l'étude nationale² conduite par l'INRAE (ex INRA) au regard de l'objectif 4p1000, ont permis d'identifier des pratiques stockantes en grandes cultures :

- Insertion ou allongement des cultures intermédiaires
- Insertion et allongement du temps de présence des prairies temporaires
- La mobilisation et l'apport au sol de matières organiques exogènes supplémentaires
- Le développement de l'agroforesterie intraparcellaire
- La plantation de haies et l'enherbement des inter-rangs en vignoble

Le potentiel de stockage additionnel lié à l'adoption de pratiques stockantes est plus important dans les systèmes de grandes cultures qui représentent 86% du potentiel additionnel total. Les pratiques avec les plus forts potentiels de stockage de carbone en grandes cultures sont :

- L'extension des cultures intermédiaires (35% du potentiel total)
- L'agroforesterie intra-parcellaire (19% du potentiel total)
- L'insertion et l'allongement du temps de présence des prairies temporaires (13% du potentiel total).

Une récente simulation complémentaire¹² à la synthèse de l'étude a montré qu'une implantation simultanée de trois pratiques stockantes (extension des cultures intermédiaires, insertion et allongement des prairies temporaires, mobilisation de nouvelles ressources organiques) permet en moyenne, à l'échelle du territoire métropolitain, un stockage additionnel de +184 kgC/ha/an sur l'horizon 0-30cm.

¹⁰ Décret n° 2018-1043 du 28 novembre 2018 créant un label « Bas-Carbone » et arrêté du 28 novembre 2018 définissant le référentiel du label « Bas-Carbone ». <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/11/28/TRER1818764A/jo/texte>

¹¹ Guide pédagogique du label bas-carbone : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/LabelBasCarbone-GuidePedagogique-Mai2020.pdf>

¹² Julie Constantin, Camille Launay, Sylvain Pellerin, Olivier Réchauchère, Olivier Théron, 2020. Effet du changement climatique sur le stockage de carbone dans les sols de grandes cultures. Complément au rapport « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? »

Les résultats de l'étude de simulation ont également souligné les facteurs de variation du stockage de carbone : le stock de carbone initial, la composition de la séquence de culture, la texture et le pH du sol ainsi que le climat. Un faible stock de carbone initial est souvent associé à un potentiel de stockage plus élevé car les pratiques stockantes sont généralement peu développées. Les stocks les plus faibles sont observés dans plusieurs zones de plaine (Bassin Parisien, Bassin Aquitain, Couloir Rhodanien, Alsace). Cependant, les zones où la pratique des cultures intermédiaires est peu ou pas employée présentent un potentiel de stockage important malgré des stocks initiaux élevés (exemple de l'insertion des cultures intermédiaires en Poitou-Charentes)

L'implantation simultanée de pratiques stockantes compatibles permet d'accroître le stockage additionnel du carbone du sol et ce d'autant plus que les conditions locales sont favorables (pratiques stockantes peu développées), possibilité de plusieurs pratiques additionnelles

La Méthode doit préciser la durée maximale de validité du Projet. Dans le cas où celle-ci est supérieure à 5 ans, les conditions d'applications particulières sur la période choisie doivent apparaître dans la Méthode.

La durée de comptabilisation des réductions d'émissions peut être supérieure ou égale à la durée de validité du projet. En effet, il est possible que la période de comptabilisation soit supérieure à la durée de validité du Projet sous réserve de garantir que des réductions d'émissions sont réalisées au-delà de la date de validité du projet. (Point IV.C. du référentiel).

La période de comptabilisation pour les projets de réductions d'émissions à l'échelle internationale est très variable (5 à 100 ans) et a tendance à se situer entre 10 et 30 ans pour les projets prenant en compte la séquestration de carbone.

4.4.3. Le scénario de référence

Chaque méthode se doit de définir un scénario de référence et démontrer l'additionnalité des réductions d'émissions.

Le scénario de référence est ce qui se serait passé en terme d'émissions sans projet, en d'autres termes, c'est le *statu quo* ou la poursuite des tendances. Il peut être spécifique à un Projet ou générique pour un type de projet. Dans ce dernier cas, un rabais sera alors appliqué (point III.C.2.b du référentiel du LBC). Le scénario de référence peut être déterminé à partir de la littérature scientifique donnant des forfaits de stockages/émissions les plus récents par rapport à un périmètre donné (facteurs par défaut du GIEC, données issues d'études nationales telles que l'étude nationale conduite par l'INRAE ou encore à partir des bases de données sol (exemple RMQS, BDAT, etc.).

Le scénario de référence doit également prendre en compte les obligations légales déjà en place pour encourager à de meilleures pratiques et inciter à aller plus loin en terme de réduction d'émissions (III.C.1 du référentiel). Cela implique que les réductions d'émissions qui auraient eu lieu en l'absence de labellisation du projet, ne peuvent pas être reconnues dans le cadre du label. De plus, le label ne prend en compte que les réductions d'émissions résultant des actions engagées après la notification du Projet à l'Autorité pour assurer la condition d'additionnalité des projets. Le terme « additionnalité » fait donc référence à ce que le Projet labélisé apportera en plus en terme de réductions d'émissions et seulement lorsqu'il va au-delà de ce qui est exigé d'un point de vue réglementaire par rapport au scénario de référence. Cette règle d'additionnalité peut donc s'avérer pénalisante pour ceux qui ont mis en place des leviers de réduction d'émissions avant l'apparition du LBC ou avant la notification du projet à l'Autorité. Toutefois, l'on pourrait considérer que le maintien de pratiques stockantes peut être encouragé, puisque leur arrêt créerait un déstockage rapide de carbone du sol.

La méthode pourrait considérer que les pratiques volontairement mises en place les 10 années précédant le projet sont additionnelles. Cela permettrait de prendre en compte les efforts mis en place avant l'apparition du label.

4.4.4. Les rabais pour le risque de non permanence :

Différents rabais sont identifiés dans le référentiel du LBC et doivent apparaître dans la méthode. Ils ont pour but de compenser le risque de surestimation des réductions d'émissions:

- Le rabais lié au degré d'incertitudes des variables influentes sur les estimations. Le degré d'incertitude pour les variables influentes intègre l'incertitude intrinsèque sur la valeur de la variable (l'incertitude de mesure par exemple) et l'incertitude sur la représentativité de la variable utilisée pour le Projet. Toutefois, les caractéristiques pour déterminer un niveau d'incertitude faible, moyen ou fort ne sont pas décrites dans le référentiel du label Bas-Carbone, elles pourraient donc se faire de manière quantitative (cf. partie 3) ou à dire d'expert selon les cas de figure.

Après détermination du degré d'incertitude, un rabais est appliqué suivant les critères du tableau 2 ci-dessous:

Tableau 7 : niveaux d'incertitudes et rabais correspondants à appliquer dans le cadre du LBC

Degré d'incertitude	Rabais à appliquer
Faible	Aucun
Moyen	Rabais à déterminer de sorte à ce que dans 80 % des cas, les réductions d'émissions sont sous-estimées
Fort	Rabais à déterminer de sorte à ce que dans 95 % des cas, les réductions d'émissions sont sous-estimées

La méthode d'attribution des rabais en fonction de l'incertitude dans la méthodologie SALM peut être une source d'inspiration pour les rédacteurs de Méthode à présenter au LBC. Les détails de calcul de l'incertitude notée UNC_t (équation 15, page 27¹³) sont fournis pour le modèle Roth C uniquement. Néanmoins, ces principes sont applicables à un autre modèle (tel que AMG) s'il présente tout ou partie des paramètres cités dans la méthodologie.

Les réductions d'émissions (RE) du projet sont ajustées ($RE_{ajusté}$) en fonction de l'incertitude UNC_t . En résumé :

- $UNC_t < 15\%$
Pas de rabais
- $15\% < UNC_t < 30\%$:
Rabais = $RE \times (UNC_t - 15\%)$
 $RE_{ajusté} = RE - \text{rabais}$
- $UNC_t > 30\%$: le porteur de projet doit augmenter la taille de l'échantillon des données d'entrées jusqu'à ce que l'incertitude soit meilleure.

Le risque de non-permanence des activités de réduction des émissions peut être pris en compte selon l'une de ces deux manières suivantes :

- Pour tout type de réduction d'émissions comptabilisées, l'application d'un rabais d'au moins 10%
- Pour les émissions anticipées, il est possible de considérer un « scénario-aléas » dans lequel sont pris en compte les événements accidentels/aléas naturels susceptibles de réduire la séquestration sur le long terme. La variation du stock moyen de carbone sur le long terme avec ce « scénario-aléas » est ensuite diminuée par la variation du stock moyen de carbone sur le long terme dans un scénario de référence (avec poursuite des tendances). Les modalités de mise en œuvre ne sont pas précisées par le référentiel, elles doivent être explicités dans la méthode.

¹³<https://verra.org/wp-content/uploads/2018/03/VM0017-SALM-Methodolgy-v1.0.pdf>

Pour le risque de non-permanence, un rabais d'au moins 10% est recommandé à l'instar de ce qui se fait pour d'autres méthodes avec des rabais pouvant aller jusqu'à 20%. Exemple de l'Alberta avec une fourchette de 7.5 à 12.5% (basé sur la probabilité de non permanence du carbone stocké) et de 20% en Australie (basé sur le coût de restauration du projet en cas de non permanence).

4.4.5. La procédure de vérification

Différentes méthodes plus ou moins précises et coûteuses pourront être employées pour la vérification selon les activités engagées pour la réduction des émissions.

Dans un premier temps, les vérifications peuvent se faire sur base déclaratives. Elles permettent également de recenser les éléments entrants dans le calcul du bilan carbone: application d'amendements organiques ou minéraux, de biochar, export ou non de pailles, etc. Le cas du biochar est particulier, car les modèles ne sont pas encore ou peu paramétrés pour ce type de produit et s'ils le sont, les paramétrages sont basés sur peu de données. Ceci entraîne une forte incertitude qu'il faudrait refléter dans la Méthode.

Pour la vérification de la présence ou non de couverts végétaux, un échelonnage tout au long de la période de comptabilisation peut être proposé. En effet, le porteur de projet peut renseigner la présence ou non de couverts végétaux qui sera confirmée par imagerie satellite à des périodes prédéfinies dans le contrat. De plus, la vérification peut être davantage précise avec le calcul de l'indice foliaire (LAI), toujours via satellite.

Il est prudent d'avoir un échantillonnage du sol suivi d'une analyse en laboratoire au moins une fois au cours du projet. Une telle mesure à mi-parcours et suivant une norme ISO par exemple pourra être déterminante pour confirmer la viabilité du projet. Toutefois, il faut rappeler que l'évolution du stock de carbone du sol est lente avec des pratiques stockantes (de l'ordre de +1 à +2% après 5 ans). Cette évolution faible ne sera pas détectable par analyse directe du stock de carbone du sol, l'ordre de grandeur de l'incertitude sur le stock étant de 4 à 5%, y compris avec des mesures fines sur le site.

Il est prudent d'avoir un échantillonnage suivi d'une analyse en laboratoire au moins une fois au cours du projet. Le suivi satellitaire pourrait être une bonne alternative pour confirmer la présence ou non de couverture végétale. Un projet de norme de mesure des stocks de C (et N) des sols est en cours et pourra servir de référence (ISO/DIS 23400 Lignes directrices pour la détermination des stocks de carbone organique et d'azote et de leurs variations dans les sols minéraux à l'échelle d'une parcelle).

FIGURES SUPPLEMENTAIRES

Paramètres et variables d'entrées considérées pour l'analyse simplifiée : rendement, température, pluviométrie, pourcentage de carbone actif du sol, teneur en argile, pH, ratio C/N et teneur en carbonates de calcium CaCO₃.

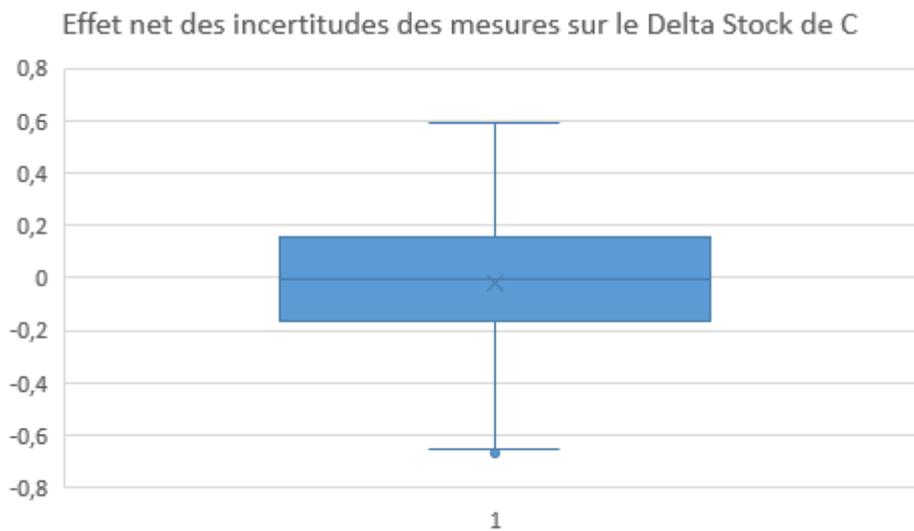


Figure 6 : Effet net calculé à partir de 100 tirages aléatoires. 1^{er} quartile = -0,167 ; 3^{ème} quartile = 0,157

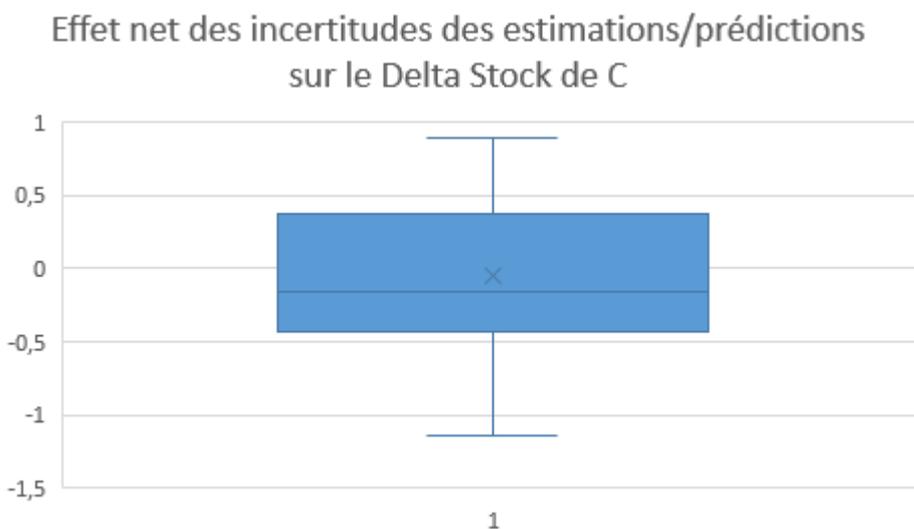


Figure 7 : Effet net calculé à partir de 100 tirages aléatoires. 1^{er} quartile = -0,434 ; 3^{ème} quartile = 0,367

5. Conclusion

La création du label Bas-Carbone est une opportunité pour le développement des projets de réduction des émissions dans le secteur agricole français. Le cadre posé exige une rigueur scientifique qui garantit la fiabilité économique, environnementale et sociale des projets labélisés. De ce fait, le choix des méthodologies de calcul de réduction des émissions et en particulier pour le stockage de carbone dans le sol requiert une grande attention sur la nature des données d'entrées, des incertitudes qui y sont liées et l'impact de celles-ci en sortie des estimations. Avec l'exemple du modèle AMG, nous avons pu mettre en évidence d'une part, une sensibilité très élevée du stock final de carbone du sol à la valeur initiale de stock utilisée pour l'initialisation du modèle, une sensibilité élevée pour des données du sol comme le pH, le C/N et la fraction de carbone stable à l'inverse d'une sensibilité moindre pour les autres variables. D'autre part, en comparant les performances du modèle AMG pour simuler les stocks de C en absolu ou en différentiel avec des couples de traitements référence vs pratiques stockantes, l'erreur du modèle (RMSE) est réduite de 30% pour une estimation d'un différentiel de stocks entre 2 pratiques plutôt que des stocks de C. **En effet, dans les cas les plus favorables (pratiques permettant un fort stockage, mesures et données d'initialisation suivant nos recommandations vis-à-vis de la sensibilité des données d'entrées en (tableau 6) et en simulant les stocks de carbone en différentiel, l'incertitude sur le stockage résultant de l'application des pratiques atteindrait environ 30%. Cette incertitude est nettement plus faible que celle sur la valeur absolue du stock de carbone pour un scénario donné de pratiques. En outre, l'utilisation d'un différentiel entre scénario de référence et scénario avec pratiques stockantes permet d'encourager les pratiques stockantes dans l'ensemble des situations, y compris pour des agriculteurs dont les sols déstockeraient du C mais moins que la référence.**

La prise en compte des mesures terrain dans les méthodes de calcul est donc importante à valoriser pour réduire les incertitudes. Dans cette optique, la méthodologie basée sur l'outil Rock-Eval® permettant de prédire la proportion de carbone organique du sol stable à l'échelle du siècle pourrait être déployée sur les échantillons de sol du RMQS (prévu pour la Région Centre dans le cadre du projet ANR StoreSoilC). Ceci permettra de réaliser une carte nationale des stocks de carbone organique du sol stable à l'échelle du siècle ; cette carte pourrait servir à initialiser systématiquement la taille du pool de carbone stable des modèles de dynamique de carbone du sol (Barré et al., 2019) à l'échelle des territoires (MAELIA/ABCterre). De plus, la procédure de suivi et de vérification inhérente à la Méthode choisie par le porteur de projet devrait contenir, au moins une mesure directe pendant la durée de validité du projet pour s'assurer du stockage effectif du carbone dans le sol. Sur un autre registre, les données acquises par télédétection satellitaire peuvent apporter des informations sur les quantités de biomasse aérienne produites par différentes cultures (cultures de vente, de couverts) qui permettront également d'affiner le paramétrage des modèles. C'est notamment ce que nous proposons avec le couplage SAFY-CO2/AMG dans l'option 3 de nos recommandations (partie III) qui est également la plus compatible avec les ambitions Européennes d'aller vers des méthodes d'évaluation et de suivi du bilan carbone à grande échelle. Même si ce couplage est encore en phase de test, cette nouvelle perspective pourra à terme, faciliter la vérification au cours du temps des bilans carbone (entre t0 et tx) dans une logique de suivi, comptabilisation et vérification de la parcelle à l'exploitation agricole et sur de grands territoires.

Nos résultats ont été soumis au groupe de travail développant la Méthode LBC grandes cultures qui a pris en compte un certain nombre de nos recommandations et les échanges sont en cours pour servir l'intérêt commun dans le développement du marché de carbone volontaire en France.

6. Annexes fiches méthodologies

6.1. Fiches des outils (modèles notamment) utilisés pour l'évaluation et le suivi du bilan carbone en France et à l'étranger : AMG, STICS, RothC, FullCAM, Rock-Eval®, CAP'zER®

6.1.1. AMG

Usage : Modèle de simulation de la dynamique du carbone organique dans le sol sous l'influence des pratiques agricoles et en fonction des caractéristiques du sol et du climat.

Informations générales

Origine : France

Auteur : INRAE, Laon.

Publication : v1 1999, v2 2019

Echelle spatiale : parcelle, unité de sol homogène

Echelle temporelle : annuelle

GES concernés : CO₂

Type de modèle : dynamique du carbone du sol

Applicabilité : 146 cultures (principales, dérobées et intermédiaires), 30 types de produits résiduaux organiques (PRO)

Suivi du modèle par le consortium de partenaires INRAE, Agro-Transfert-RT, Terres Inovia, Arvalis.

Description

Le modèle AMG est un modèle semi-mécaniste simple avec trois compartiments. Le premier compartiment, de matière organique fraîche (MOF) entrante, est constitué des résidus et produits résiduaux organiques (PROs). Le carbone (C) organique humifié du sol est constitué de deux compartiments : l'un dit « actif » et décomposable, alimenté par la MOF, tandis que l'autre est considéré comme « stable » c'est-à-dire inerte à l'échelle de la durée d'une simulation (quelques décennies au moins). Trois paramètres majeurs sont à considérer : le coefficient d'humification des entrées de C au cours du temps (dépendant du type et de la qualité de la MOF), le coefficient de minéralisation annuel du C organique actif du sol (dépendant des conditions pédoclimatiques) et le coefficient de partition entre C actif et C stable au début de la simulation (dépendant de l'historique de pratiques et d'occupation du sol ou estimation par méthode Rock-Eval®; cf. fiche « Rock-Eval® »).

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
- Données sol (teneur en C org., argile, CaCO ₃ , pH, C/N, densité apparente, éléments grossiers) - Données climatiques annuelles (température, ETP, précipitations) - Données pratiques agricoles (irrigation, travail du sol), rotations culturales, rendements et/ou biomasses entrantes mesurées	- Stock et concentration de C organique du sol - Flux de biomasses retournées au sol, C organique humifié associé et C organique actif du sol décomposé (ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Caractéristiques allométriques des cultures Coefficients d'humification des résidus de cultures et PRO

Pour en savoir plus : <https://www6.hautsdefrance.inrae.fr/agroimpact/Nos-dispositifs-outils/Modeles-et-outils-d-aide-a-la-decision/AMG-et-SIMEOS-AMG>

Andriulo A. et al, 1999³, Clivot H. et al, 2019⁴

6.1.2. STICS

Usage : Modèle de simulation de la croissance des plantes et des flux d'azote, de carbone et d'eau dans le système sol-plante, sous l'influence du climat et des pratiques agricoles.

Informations générales

Origine : France

Auteur : INRAE

Publication : 1996, dernière version standard en 2019 (v9.1)

Echelle spatiale : parcelle, unité de sol homogène

Echelle temporelle : journalière

GES concernés : CO₂, N₂O

Applicabilité : grandes cultures, prairies temporaires

Type de modèle : sol-plante

Description

STICS est un modèle sol-plante qui simule au pas de temps journalier les bilans de carbone (C), d'eau et d'azote (N) du système sol-plante et peut estimer simultanément des variables agricoles et environnementales (par exemple, le rendement des cultures, la teneur en N des céréales récoltées, la teneur en eau et en N minéral du sol, le lessivage de l'azote et la dynamique du carbone organique du sol) en tenant compte de l'impact du sol, des cultures et des pratiques de gestion (par exemple, la fertilisation minérale et organique, l'irrigation, le travail du sol et la gestion des résidus). Il a été conçu comme un modèle générique capable de s'adapter facilement à divers types de cultures et de conditions environnementales. Il peut être utilisé pour simuler une période culturale ou une succession culturale sur plusieurs années. Les formalismes permettant de simuler l'évolution du carbone organique du sol sont proches de ceux d'AMG.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
- Données sol (teneur en C et N org., argile, CaCO ₃ , pH, C/N, densité apparente, HCC, HPF, éléments grossiers) - Données climatiques journalières (température mini et maxi, précipitations, ETP, rayonnement global) - Données pratiques culturales: dates de semis et récolte, espèces et variétés, densité et profondeur de semis, date et dose des irrigations, date et profondeur du travail du sol, date, nature et doses des fertilisations azotées, gestion des pailles.	Variables agricoles : rendement, biomasse, qualité des organes récoltés (teneurs en huile et N) Variables environnementales : stocks de C et N organique du sol, bilans H ₂ O (drainage, ETR), lixiviation de nitrates, émissions de CO ₂ , N ₂ O, NH ₃ et N ₂	

Pour en savoir plus :

<https://www6.paca.inrae.fr/stics/Qui-sommes-nous/Presentation-du-modele-Stics>

[Brisson et al, 2003⁵](#); [Coucheney et al, 2015⁶](#)

6.1.3. Métamodèle du projet CarSolEI

Usage : Le métamodèle développé dans le projet CarSolEI est destiné à prédire les variations de stock de carbone organique dans les sols pour les systèmes de prairies permanentes et de cultures en rotations avec ou sans prairie temporaire. C'est un modèle simple d'utilisation : ses variables d'entrée sont en nombre restreint et prévues pour être disponibles en exploitation ; et il est doté d'une interface qui facilite la saisie des entrées.

Informations générales

Origine : France

Année de conception : en cours (projet CarSolEI – livraison prévue pour fin 2021)

Auteur : IDELE-INRAE

Echelle spatiale : parcelle, unité de sol homogène

Echelle temporelle : moyenne annuelle sur 30 ans

GES concernés : CO₂, N₂O

Type de modèle : Métamodèle statistique

Applicabilité : prairies permanentes, grandes cultures, prairies temporaires

Modèle sous-jacent : Stics et Pasim.

Description

Le métamodèle de CarSolEI est un résumé des modèles Stics et Pasim concernant le stockage de carbone du sol, obtenu statistiquement à partir de la base de données de l'étude nationale 4p1000. Concrètement, ce métamodèle est un ensemble de six forêts aléatoires, correspondant à deux profondeurs de sol x trois types de couverts : prairie permanente, rotations grandes cultures seules, et rotations avec prairie temporaire. Selon le type de couvert, le modèle prend en entrée entre 20 et 25 paramètres correspondant aux conditions pédoclimatiques et à la conduite des surfaces.

Le métamodèle peut être utilisé pour calculer les variations de stocks de carbone soit

i) directement sous le logiciel libre R (plus rapide pour un grand nombre de jeux de paramètres d'entrées)

ii) à travers l'application Rshiny qui facilite la saisie des entrées avec notamment la possibilité de sélectionner une zone géographique pour proposer un paramétrage par défaut des conditions pédoclimatiques. A terme, l'application Rshiny sera utilisable à travers un simple navigateur web, sans connaissance de R.

Une première version du métamodèle et de son interface a été développée et est en cours de test.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">• Climat : type de climat, température mini et maxi, pluviométrie• Sol : stock de C organique initial, profondeur, taux de cailloux, pH, taux de calcaire, taux d'argile, taux de sable, texture• Couverture du sol : prairies permanente/grandes cultures/rotation prairie-cultures, durée de la rotation, part des prairies dans la rotation, part des cultures intermédiaires• Conduite générale : fertilisation azotée minérale, fertilisation organique (quantité et nature), irrigation• Conduite des prairies : fauche/pâturage, matière sèche fauchée annuellement, nombre de passages de pâturage, et pression annuelle de pâturage (jours*UGB)	Variation de C organique du sol moyenne par an (kg C.ha ⁻¹ .an ⁻¹ , calculée sur 30 ans) : <ul style="list-style-type: none">• sur la couche 0-30 cm• sur la profondeur totale du sol (maximum 1m)	Les données d'entrée (saisies manuellement sur l'interface, ou dans des fichiers) peuvent avoir des sources diverses ; tout peut être saisi à partir des données de l'agriculteur (pratiques, analyses de sol...). L'interface donne aussi la possibilité d'utiliser les données pédoclimatiques de l'étude 4p1000 : base de données géographiques des sols de France (BDGSF, de l'INRAE Infosol), données Météo-France SAFRAN (traitées par l'INRAE Agroclim).

Pour en savoir plus : [projet CarSolEI](#); laure.brun-lafleur@idele.fr; Helene.Chambaut@idele.fr

6.1.4. Rothamsted Carbon: Roth-C

Usage : Le principal objectif du modèle est de calculer les variations de stock de carbone organique dans les sols en lien avec les entrées de carbone, pour des systèmes cultivés et des forêts. Il peut être utilisé pour prédire les variations de carbone passées ou futures sur le long terme, en lien avec changements climatiques. Le modèle nécessite de spécifier les entrées de carbone dans le sol et ne comporte donc pas de module de production de biomasse. En mode inverse, il est utilisé pour savoir quelles quantités de carbone entrant dans les sols seraient nécessaires pour atteindre un niveau de stock de carbone donné. C'est un modèle très simple d'utilisation et qui présente un nombre restreint de variables d'entrées et de paramètres. Le modèle a été très largement utilisé dans le monde depuis les années 90, et cette large utilisation a, au fil du temps, produit des éléments quant à la validité du modèle dans différents contextes.

Informations générales

Origine : Angleterre

Auteur : IACR - Rothamsted (Coleman and Jenkinson)

Publication: 1990

Echelle spatiale : parcelle

Echelle temporelle : mensuelle

GES concernés: CO₂

Type de modèle : dynamique du carbone organique du sol

Applicabilité : grandes cultures, prairies, forêts

Description

Roth-C est un modèle de simulation de la dynamique du carbone organique en surface des sols (excepté les sols humides, les sols organiques et les andosols) en tenant compte du type de sol, de la température, de l'humidité et de la couverture végétale. Le modèle a initialement été développé pour calculer les émissions/séquestrations de carbone pour la mise en place de pratiques agricoles particulières. C'est un modèle à compartiments, dont l'un représente le carbone organique inerte du sol (ayant un temps de résidence très élevé). Les quatre autres compartiments représentent le carbone issu directement des résidus végétaux (RPM et DPM), contenu dans la biomasse microbienne (BIO) et des formes humifiées de la matière organique (HUM). En contexte agricole, l'essentiel des pratiques sont représentées par le biais de modulations des entrées de carbone dans le sol, en quantité et en qualité. Seules les pratiques qui déterminent les périodes de couverture du sol et l'irrigation ont un impact sur les niveaux de minéralisation du carbone.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">• Température, précipitations, évapotranspiration• Irrigation• Nature du couvert (grandes cultures, prairies, forêts)• Données sol (Pourcentage d'argile, profondeur de la couche de sol échantillonné), stock de carbone organique initial (et proportion de carbone inerte).• Couverture du sol (nu ou couvert)• Apport mensuel de résidus végétaux (y compris carbone libéré des racines pendant la croissance des cultures)• Apport d'amendement organique• Composition des matières organiques apportée (amendements et résidus de culture)	<ul style="list-style-type: none">• Carbone organique total (t. ha⁻¹)• Carbone dans les différents compartiments dont la biomasse microbienne (t. ha⁻¹)• $\Delta^{14}\text{C}$ (duquel on peut déterminer l'âge équivalent du radiocarbone du sol)	Les données d'entrée (saisies manuellement sur l'interface, ou dans des fichiers) peuvent avoir des sources diverses ; tout peut être saisi à partir des données de l'agriculteur (pratiques, analyses de sol...).

Pour en savoir plus : <https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc>

6.1.5. Fully integrated Carbon Accounting Model: FullCAM

Usage : FullCAM est un modèle d'évaluation et de suivi des émissions de gaz à effet de serre et de l'évolution des stocks de carbone liés aux différents changements de pratiques de gestion. Il permet d'estimer et prédire toute la biomasse, les déchets et les stocks de carbone du sol dans les systèmes agricoles et forestiers. Il peut être également utilisé plus simplement pour examiner les résultats des projets pour les petites exploitations foncières. Pour la réalisation des inventaires nationaux, Fullcam fournit la possibilité d'une modélisation à l'échelle nationale tout en ayant une résolution spatiale fine.

Informations générales

Origine : Australie

Publication: 1997

Auteur : Australian Government, Dpt. of the Environment

Echelle spatiale : 25 m

Echelle temporelle : mensuelle

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Type de modèle : dynamique de carbone du sol

Applicabilité : forêts, grandes cultures, prairies

Description

FullCAM est constitué de 3 modèles qui peuvent être exécutés individuellement de manière isolée ou dans toute autre combinaison en fonction des données de sortie recherchées:

- CAMfor (Carbon Accounting Model for Forestry Models carbon cycling in a forest, including the trees, debris and soil. Forest growth can be included as yield curves, empirical growth formula, or process modelling.)
- CAMAg (Carbon Accounting Model for Agriculture Models carbon cycling in an agricultural system, including the crops, debris, soil, minerals, and agricultural products. Includes both cropping and grazing.)
- Roth C (Rothamsted Institute active soil Carbon model → Modélise le cycle du carbone dans le sol actif).

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">• Données à entrer par l'utilisateur en fonction des objectifs• Données par défaut disponibles par espèce et pratiques de gestion	<ul style="list-style-type: none">• Stock de carbone• Flux de carbone• Analyse de sensibilité (via approche Monte Carlo)	

Pour en savoir plus: <https://publications.industry.gov.au/publications/climate-change/climate-change/climate-science-data/greenhouse-gas-measurement/land-sector.html>

6.1.6. Rock-Eval®

Usage : A l'origine, l'outil Rock-Eval® est une technique d'analyse thermique standardisée dans l'industrie pétrolière pour estimer le potentiel pétrolier d'une roche mère. Depuis une vingtaine d'années, cet outil sert aussi à caractériser la matière organique du sol et plus récemment à déterminer la quantité de carbone organique stable à l'échelle du siècle dans le sol (Cécillon et al., 2018 ; Biogeosciences). La quantité de carbone organique stable du sol estimé par cette méthode peut être utilisée pour initialiser le coefficient de partition entre C actif et C stable du modèle de dynamique du carbone du sol AMG (cf. fiche « AMG »), ce qui améliore la précision des simulations de ce modèle.

Informations générales

Origine : France

Fabricant de l'analyseur Rock-Eval® : Vinci Technologies

Auteurs : Cécillon et al. (2018 ; Biogeosciences ; <https://doi.org/10.5194/bg-15-2835-2018>)

Description

Méthode basée sur l'analyse thermique rapide (environ 45 minutes/échantillon) d'un échantillon en 2 phases : une phase de pyrolyse et une seconde phase en présence d'oxygène, avec suivi des gaz évolués lors des deux phases.

A l'issue de l'analyse on obtient les concentrations de C organique et inorganique de l'échantillon de sol. On obtient également des informations sur la chimie brute (richesse de la matière organique en O et en H) et la stabilité thermique de la matière organique de l'échantillon. Des travaux récents montrent que certains paramètres Rock-Eval® sont fortement corrélés à la stabilité biogéochimique du C organique du sol (Barré et al., 2016 ; Biogeochemistry).

Un modèle statistique (Cécillon et al., 2018, Biogeosciences) utilisant comme données d'entrées une série de paramètres Rock-Eval® d'un échantillon de sol permet d'estimer la quantité de C organique stable à l'échelle du siècle dans cet échantillon.

La quantité de carbone organique stable du sol estimé par cette méthode peut être utilisée pour initialiser le coefficient de partition entre C actif et C stable du modèle AMG (cf. fiche « AMG ») en début de simulation, ce qui améliore la précision des simulations d'évolution des stocks de carbone organique du sol dans les sols cultivés (démonstration sur 10 essais agronomiques de long terme en France ; projet ANR StoreSoilC, thèse d'Eva Kanari ; communication EGU Barré et al. (2019)).

Pour en savoir plus : Barré, P., et al., 2016⁷; Cécillon, L. et al., 2018⁸ ; Barré, P. et al., 2019⁹

6.1.7. Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevage de Ruminants : CAP'2ER®

Usage : Outil de calcul pour l'évaluation des impacts environnementaux à l'échelle d'une exploitation d'élevage de ruminants et par atelier (bovin lait, bovin viande, ovin viande) dans le but de sensibiliser et mettre en place des plans d'action. CAP'2ER® permet également de faire le lien entre les performances environnementales, techniques et économiques.

Informations générales

Origine : France

Auteur : Institut de l'élevage (IDELE)

Année de conception: format Excel (2012), outil informatisé (2015)

Echelle spatiale: exploitation, atelier

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Applicabilité : exploitations d'élevage de ruminants

Type d'outil : basé sur des facteurs d'émissions, des données empiriques et forfaits stockage/déstockage issus de la littérature.

Description

Principe de calcul similaire à une analyse de cycle de vie (ACV) jusqu'au portail de l'exploitation avec la prise en compte des émissions liés aux intrants. L'analyse peut se faire en deux niveaux : par atelier (niveau 1, pour sensibiliser) ou à l'échelle de l'exploitation prenant en compte plusieurs ateliers (niveau 2, pour la mise en place d'un plan d'action). Pour un atelier générant plusieurs produits, une allocation des impacts environnementaux est réalisée pour ceux-ci.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
Détail des différents postes d'émissions dans le guide méthodologique (voir lien ci-dessous)	<ul style="list-style-type: none">• Les consommations d'énergie directe (fioul, électricité utilisé sur l'exploitation) et indirecte (fabrication et transport des intrants)• Les émissions de gaz à effet de serre contribuant au changement climatique• La qualité de l'eau (pertes d'azote et de phosphore, potentiel d'eutrophisation)• La qualité de l'air (acidification de l'air)• Le stockage de carbone et l'empreinte carbone nette (prairies et cultures avec ou sans rotations)• La biodiversité (indicateurs de maintien de la biodiversité)• La performance nourricière	<ul style="list-style-type: none">• Facteurs du GIEC Tier2, 2006• DiaTerre version 3.45 (2014)• Ecoinvent (2012)• Agribalyse version 1.1 (2014)• EMEP Corinair, 2013• Dollé et al., 2013• Mondferent (2013)

Pour en savoir plus : http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/guide-methodologique-cap2er.html

6.2. Fiches des méthodologies développées ou en cours de développement en France et à l'étranger pour l'évaluation et le suivi des réductions d'émissions :

6.2.1. CarbonAgri

Usage : Méthode de comptabilisation des réductions d'émissions à destination des projets additionnels souhaitant obtenir le Label Bas-Carbone.

Informations générales

Origine : France

Auteur : IDELE

Publication: septembre 2019

Echelle spatiale : exploitation, atelier (animal ou végétal)

Echelle temporelle : annuelle

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Outil sous-jacent : CAP'2ER ®

Applicabilité : Exploitations polycultures élevage

Description

Méthode de suivi des réductions d'émissions en élevages bovins et de grandes cultures approuvée par le Label Bas-Carbone. Les leviers de la méthode concernent six sources d'émissions, à savoir la gestion et l'alimentation du troupeau, la gestion des déjections animales, la gestion des cultures, la consommation d'engrais et d'énergie, ainsi que la séquestration de carbone par les sols et la biomasse.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">• Données relatives au troupeau• Données relatives aux surfaces• Données consommations d'énergie• Facteurs d'émissions correspondants	Réductions d'émissions nettes	Lignes directrices du GIEC,2006 Agribalyse IMPACT Base de donnée Carbone de l'ADEME Résultats d'études : <ul style="list-style-type: none">• « Quel potentiel au regard de l'objectif 4p1000 et à quel coût ? »• GESTIM+

Pour en savoir plus : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/M%C3%A9thode%20C3%A9levages%20bovins%20et%20grandes%20cultures%2028Carbon%20Agri%29.pdf>

6.2.2. SAFY-CO2, Simple Algorithm For Yield and CO₂ flux estimates:

Usage :

- Estimation de la biomasse aérienne et souterraine, du rendement,
- Estimation des variables liées au bilan C : Flux de CO₂ (photosynthèse, respiration du sol et de la plante), export de C à la récolte
- Estimation des composantes du bilan d'eau en mode couplé au module eau (version SAFYE-CO2 ; voir Veloso 2014)
- ➔ Modèle permettant de tester l'impact de certaines pratiques type (couvert intermédiaires, export paille) sur les flux et bilans en particulier de C.

Informations générales

Origine : France

Auteur : Cesbio, Toulouse

Publication: SAFY-CO2 et SAFYE-CO2 2014¹, SAFY-CO2 2020²

Echelle spatiale : parcelle (voire 10m)

Echelle temporelle : journalière

GES concernés: CO₂

Type de modèle sous-jacent : agro-météorologique

Applicabilité : Grandes cultures (blé, tournesol, maïs, colza) et cultures intermédiaires/repousses/adventices

Description

Le modèle SAFY-CO2 est un modèle agro-météorologique fonctionnant à un pas de temps journalier assimilant des données optiques de télédétection (cartes dynamiques de LAI) pour estimer la production végétale et les composantes du bilan carbone à un pas de temps annuel. Il utilise l'approche de Monteith pour calculer la production primaire brute (GPP). La respiration autotrophique (Ra) est séparée en respiration d'entretien et de croissance. La production primaire nette (NPP, qui est la différence entre la GPP et Ra) est ensuite répartie entre fraction aériennes et racinaires. Les biomasses sèche aérienne (DAM) et racinaires sont ensuite calculées à partir des NPP aériennes et racinaires en considérant la teneur en carbone des tissus. La biomasse aérienne est ensuite convertie en 1) LAI grâce à une fonction de partage des feuilles et 2) en rendement à la fin de la période de croissance grâce à un indice de récolte (HI). La respiration des sols (respiration hétérotrophe) est calculée en utilisant une simple fonction Q10 de la température. Il n'y a pas de module simulant l'évolution de la matière organique du sol dans la version actuelle du modèle (couplage avec AMG en cours). La NEE est calculée à un intervalle de temps quotidien en tenant compte de la GPP, de la Ra et de la Rh, puis agrégé à une échelle annuelle (année de culture). Le bilan de carbone annuel est calculé en tenant compte de la NEE annuelle et de la quantité de C exportée à la récolte (rendement).

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
Cartes de LAI et de culture Rayonnement global, température (et pluviométrie pour la version couplée à un module eau = SAFYE-CO2) Informations sur l'exportation ou non de pailles, la quantité de C fournie par amendement organique.	Biomasse aérienne et souterraine, LAI, rendement, photosynthèse, respiration autotrophe et hétérotrophe NEE, Bilan C (évaporation et transpiration lorsqu'il est couplé à un module d'eau).	RPG ou carte de culture produite par télédétection pour l'occupation du sol Produit LAI THEIA pour la France ou Copernicus pour l'Europe Données climatiques SAFRAN (Météo France) pour la France, ERA5 (ECMWF) pour l'Europe En mode couplé au bilan d'eau du sol, besoin de données sol (texture, profondeur) provenant de Global Soil Map ou Soil Grid.

Pour en savoir plus : <https://www.cesbio.cnrs.fr/la-recherche/activites/modeliser-codes-et-modelisation/liste-et-descriptif-des-modeles/modspa/>

6.2.3. CarbOn Management Evaluation Tool for whole FARM GHG accounting : COMET-Farm

Usage : Comet-Farm Tool est un outil qui permet de réaliser un bilan GES complet de toute l'exploitation agricole avec la possibilité d'évaluer les pratiques de gestion à un temps t et dans divers scénarios de changements de pratiques préconçus ou déterminés par l'utilisateur.

Informations générales

Origine : Etats-Unis d'Amérique

Auteur : USDA, NRCS and CSU, NREL

Publication: 2005

Echelle spatiale : parcelle /exploitation

Echelle temporelle : journalière

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Modèle sous-jacent : DayCent

Applicabilité : Grandes cultures, prairies, agroforesterie, vignobles/vergers, élevage

Description

Le fonctionnement de l'outil se base sur la combinaison de modèles de simulation de processus (DAYCENT pour le CO₂ et le N₂O), de modèles empiriques et de facteurs d'émissions par défaut du GIEC et des résultats de recherche évalués par des pairs. L'interface permet à l'utilisateur de renseigner les informations jusqu'à la parcelle.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none"> • Localisation(Etat, comté), parcelle • Données sol • Ecosystème cultural <p>Données pratiques de gestion passées, actuelles et futures (menu déroulant)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs par défaut sont fournies pour l'utilisation des intrants et du carburant mais peuvent être modifiées par l'utilisateur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bilan GES complet pour l'ensemble de la ferme détaillée par type de parcelle, d'élevage et de consommation (et production) d'énergie • Intensité des émissions de GES (ex. par unité de rendement) • Incertitudes quantifiées à l'aide d'une approche empirique (observations et simulations analysées avec un modèle linéaire) ainsi qu'une approche Monte Carlo 	<ul style="list-style-type: none"> • cartes de sol SSURGO • carte climatique NCDC • USDA National Agricultural Statistics Service (NASS) • USDA ERS Cropping Practices Surveys • NRCS NRI data • Agroecosystem soil database (CSU-NREL) • Tree biomass data (FIA, Jenkins et al., 2003 model)

Pour en savoir plus : <http://comet-farm.com/>

6.2.4. VCS – Adoption of Sustainable Agricultural Land Management: SALM

Usage : Méthodologie d'évaluation et de suivi des GES pour des projets qui réduisent les émissions en agriculture par l'adoption de pratiques de gestion durable des terres (SALM) dans les écosystèmes agricoles.

Informations générales

Origine : Internationale

Auteur : Neil Bird, the BioCarbon Fund

Echelle spatiale : parcelle

Echelle temporelle : mois

Modèle sous-jacent : Roth C

GES concernés : CO₂, N₂O, CH₄

Applicabilité : grandes cultures, prairies, forêts hors zones humides.

Description

La méthodologie se base sur des modèles analytiques validés par la communauté scientifique (Roth C pour la version actuelle) pour l'estimation du C organique du sol pour chacune des pratiques de gestion identifiées;

L'évaluation des incertitudes ainsi que le protocole de suivi des activités du scénario et des évaluations (Activity Baseline and Monitoring Survey ABMS) est à ce jour uniquement adapté pour le modèle Roth C.

Pour les autres GES :

- les émissions de N₂O provenant de l'utilisation d'engrais et les stocks de C dans les plantes vivaces ligneuses se basent sur la méthodologie de calcul du CCNUCC « AVR CDM project activities ».
- les émissions de N₂O provenant des espèces fixatrices d'azote, des résidus ainsi que celles de N₂O et le CH₄ émises lors d'une combustion, sont calculés sur la base d'équations Tier 1 (facteurs par défauts du GIEC) ou Tier 2 (données spécifiques au pays)

Données : Voir fiche Roth C

Pour en savoir plus : <https://verra.org/methodology/vm0017-adoption-of-sustainable-agricultural-land-management-v1-0/>

6.2.5. VCS VM0042 – Methodology for Improved Agricultural Land Management

Usage : Protocole de comptabilisation des réductions d'émissions de gaz à effet de serre et du stock de carbone dans le sol pour la génération et la délivrance de crédits carbone associés à une meilleure gestion des terres cultivées.

Informations générales

Origine : Internationale

Auteur: David Shoch and Erin Swails (TerraCarbon LLC) & Indigo Ag Inc.

Année de publication : 2020 (version 1)

Echelle spatiale : unité d'échantillonnage (ex., ferme)

GES concernés : CO₂, N₂O, CH₄

Modèle sous-jacent : non spécifié, choix de modèles selon critères, données empiriques et par défaut

Applicabilité: grandes cultures et prairies (sans changement d'usage des terres) hors zones humides

Description

La méthodologie VM0042 est flexible et propose trois approches d'évaluation dont :

- 1) l'utilisation de modèles (Quantification approach 1). Le modèle doit répondre à des critères de calibration, de validation et de vérification précisés dans un protocole dédié VMD0053 – *Model Calibration, Validation, and Uncertainty Guidance for the Methodology for Improved Agricultural Land Management*. Ce protocole est destiné à tester la performance du modèle en tant que composante de la procédure de quantification des crédits carbone.
- 2) l'utilisation de mesures directes avant et après projet (Quantification approach 2). A ce jour cette approche ne peut être mise en œuvre car elle repose sur des critères de performances régionaux de la ligne de base non encore identifiés et approuvés par Verra.
- 3) et le calcul à partir de données par défaut à l'échelle de du pays ou de la région/Etat (Quantification approach 3).

Les paramètres de suivi sont collectés et enregistrés à l'échelle de l'unité d'échantillonnage et les réductions d'émissions sont estimées indépendamment pour chacune d'elles. L'objectif principal lors de ce suivi est de quantifier la variation du stock de carbone organique du sol et les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O résultant du scénario projet pendant la période d'attribution des crédits et avant chaque vérification. La méthodologie prévoit en particulier la prise en compte du carbone organique des sols et du carbone de la biomasse aérienne et souterraine (en option). Une liste non exhaustive des pratiques couvertes par la méthodologie inclue la réduction de la fertilisation, une meilleure gestion de l'irrigation et du travail du sol, le retour au sol des résidus de culture, une meilleure gestion des semis et récolte (plantes de couverture dans les rotations, culture en relais, etc.) ainsi que les systèmes de pâturages.

Pour en savoir plus: https://verra.org/wp-content/uploads/2020/10/VM0042_Methodology-for-Improved-Agricultural-Land-Management_v1.0.pdf

6.2.6. Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre agricole intégrant le Carbone du sol, sur un Territoire: ABC'Terre

Usage

ABC'Terre est une méthode spatialisée conçue pour quantifier, à l'échelle territoriale, les impacts des pratiques culturales sur la variation à long terme des stocks de carbone organique de la couche arable (à l'aide du modèle AMG) et pour inclure cette variation dans un bilan de GES des systèmes de culture d'un territoire.

Informations générales

Origine : France

Auteur : Agro-Transfert Ressources et Territoires

Echelle spatiale : systèmes de culture d'un territoire (et unité cartographique de sol pour les cartographies)

Echelle temporelle : année

Modèle sous-jacent : AMG

GES concernés: CO₂, N₂O

Applicabilité : grandes cultures, prairies temporaires (< 3 ans), prairies permanentes

Description

La méthode ABC'Terre consiste en cinq étapes :

- (1) Reconstitution des rotations par type de sol et par type d'exploitation à l'aide de l'outil RPG-Explorer ;
- (2) Affectation des teneurs en C organique de la couche arable, issues de la Base de Données Analyse de Terre (BDAT) aux types de sol du Référentiel Régional Pédologique (à partir d'une méthode développée dans le cadre d'ABC'Terre) ;
- (3) Reconstitution des pratiques culturales pour chaque rotation par type de sol et par type d'exploitation ;
- (4) Simulation de l'évolution du COS à long terme à l'aide de l'outil Simeos-AMG ;
- (5) Calcul du bilan GES des systèmes de culture reconstitués sur le territoire, à partir des facteurs du GIEC, d'Agribalyse (principalement) et des données d'entrées et de sorties de Simeos-AMG.

Données

En entrée	En sortie	Bases de données
<ul style="list-style-type: none"> • Voir données d'entrées AMG • En plus : itinéraires techniques par culture et intrants apportés 	<ul style="list-style-type: none"> • Stocks initiaux de carbone par type de sol et par unité cartographique de sol (UCS) ; • Evolution des stocks SOC pour chaque système de culture reconstitué par type de sol ; • Flux de biomasse végétale retourné au sol et COS humifié associé en moyenne.ha⁻¹.an⁻¹ • Émissions de GES de chaque système de culture reconstitué à différentes échelles (de chaque culture, de chaque système de culture et du territoire) 	RPG RRP (ou Typterre) BDAT Agribalyse

Pour en savoir plus : Marion Delesalle, Olivier Scheurer, Philippe Martin, Nicolas Saby, Thomas Eglin, Annie Duparque. 2019¹⁰.

6.2.7. Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment: MAELIA

Usage

Plateforme multi-agents de modélisation et de simulation pour évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements d'activités agricoles, de modes de gestion des ressources naturelles (ex. eau) et/ou globaux (démographie, changements d'utilisation des terres et changements climatiques).

Informations générales

Origine : France

Echelle spatiale : parcelle, exploitation agricole

Auteur : INRAE

Echelle temporelle : journalière

Modèles sous-jacents : AqYield-NC, SWAT®...

GES concernés : CO₂, N₂O

Applicabilité : Grandes cultures, prairies, agroforesterie et dynamique de troupeaux à venir

Description

La plateforme permet de réaliser une simulation dynamique du cycle du C dans chaque parcelle d'un « territoire » en fonction des spécificités propres des parcelles (sol, climat), des systèmes de culture et des contraintes de fonctionnement de l'exploitation. Le modèle de système de culture AqYield est utilisé pour simuler les interactions journalières entre la dynamique des cycles de l'eau (eau disponible dans le sol, évaporation, transpiration et drainage), l'azote (absorption, lixiviation, volatilisation, N₂O), le développement des couverts végétaux (cultures et couverts intermédiaires) et finalement la dynamique du carbone organique du sol au cours de l'année pour chaque parcelle d'un territoire. Les principaux indicateurs évalués sont relatifs aux cycles de l'eau, de l'azote et du carbone, à la qualité physique et biologique des sols, aux marges semi-nette et à la nature et aux quantités de travail, de l'échelle de la parcelle à celle du territoire. Il est possible de réaliser des simulations des situations actuelles (diagnostic) ou sous scénarios climatiques, de changement de système de culture, de prix, etc.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none"> Propriétés du sol (teneur en argile, capacité de rétention d'eau du sol et profondeur du sol, pH, Caco₃, DA, C/N, Corg initial), Données climatiques journalières (température moyenne, précipitations et de référence), Règles de décision de la conduite des cultures pour le travail du sol, semis, fertilisation, irrigation, récolte. 	<ul style="list-style-type: none"> Rendement Dynamique du carbone organique et stock de carbone final Lixiviation de l'azote, Emissions de GES, Etat de l'eau du sol, stress azoté et hydrique Quantité et nature du travail Marge semi-nette 	<ul style="list-style-type: none"> Bases de données nationale ou locale (1/1 000 000, 250 000, 50 000) Données météorologiques de SAFRAN (grille 8*8 km²) ou projections climatiques Emprise spatiale des exploitations via le registre parcellaire graphique (RPG) anonymisé. Base de données INRAE pour les séquences des cultures Règles de conduite des cultures à dire d'experts

Pour en savoir plus : <http://maelia-platform.inra.fr/>

6.2.8. Méthode haie - CARBOCAGE

Usage : Méthodologie à destination des projets de réductions d'émissions pour l'obtention d'un label Bas-Carbone pour l'implantation des haies bocagères. Elle vise à comptabiliser les réductions d'émissions permises par l'augmentation du stockage du carbone dans les sols et la biomasse par le biais d'une gestion durable des haies bocagères des exploitations agricoles en France.

Informations générales

Origine : France

Echelle spatiale : Exploitation agricole

Auteur : Chambre d'agriculture Pays de la Loire

Durée des projets : 15 ans

Publication : En cours de rédaction

GES concernés : CO₂, CH₄ (optionnel)

Type de méthode : Empirique

Applicabilité : Haies bocagères essences locales, non invasives et diversifiées.

Description

La méthode est basée sur les résultats expérimentaux du projet CARBOCAGE dont un protocole de mesure pour évaluer le stockage de carbone dans les sols. Cette base a servi à établir une correspondance entre le stock de carbone additionnel et l'âge d'implantation initial des haies dans le Grand-Ouest (des alternatives sont proposées pour les projets situés hors du territoire du Grand-Ouest). Après un diagnostic initial, un plan de gestion et un guide de gestion sont proposés au porteur de projet. Le guide comporte une liste des pratiques de gestion qui permettent d'optimiser le stockage de carbone dans la biomasse et les itinéraires de maintien et de conversion pour chaque typologie (6 types de haies en concordance avec la typologie nationale). De plus, à chaque itinéraire est affecté un potentiel de stockage par compartiment (aérien, racinaire ou sol). La méthode établie également la liste des rabais en accord avec les exigences du label National Bas-Carbone.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
Pour le Grand-Ouest : carbone additionnel issu des résultats du projet Carbocage Pour les autres régions : coefficient de correspondance sur la base des conditions pédoclimatiques par grande région	Stock de carbone additionnel selon l'âge de l'implantation d'une haie (teqCO ₂ /ha/an)	GIS Sol Protocole Carbocage pour l'établissement de références locales

Pour en savoir plus : <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/publications/publications-des-pays-de-la-loire/detail-de-la-publication/actualites/projet-carbocage-valorisez-le-carbone-stocke-par-les-haies-sur-vos-territoires/>

6.2.9. Measurement of Soil Carbon Sequestration in Agricultural Systems Methodology determination 2018

Usage : Méthodologie d'évaluation des réductions d'émissions des projets agricoles pour la délivrance des crédits carbone Australiens (Australian Carbon Credit Units : ACCUs). Elle a été approuvée dans le cadre du programme des réductions d'émissions nationales (Emission Reduction Fund : ERF).

Informations générales

Origine : Australie

Echelle spatiale : Zones d'estimation du carbone (CEA), voir supplément VO. 1.0 – January 2018

Auteur: Minister for the Environment and Energy, Australia)

Publication: Authorised Version F2018L00089 registered 07/02/18

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Applicabilité : Grande culture, pâturage et horticulture

Type de méthode : basé sur des facteurs d'émissions Nationaux

Description

Cette méthodologie permet de déterminer un différentiel de stock de carbone entre une situation de référence et un projet ayant adopté une ou plusieurs nouvelles pratiques (vis-à-vis de la référence). La variation du carbone organique du sol (associé à une probabilité de dépassement de 60 %) pour une période de validité du projet donnée est d'abord calculée. Le stock de carbone créditable est ensuite déterminé grâce à l'ajustement de cette variation et de la différence moyenne annuelle des émissions entre la référence et le projet. Les postes d'émissions considérés sont le sol, le bétail, l'application d'engrais synthétique, l'application de chaux, les activités de travail du sol, les activités de modification du paysage du sol, les résidus et l'énergie utilisée pour l'irrigation. La vérification se fait en plusieurs étapes tout au long du projet au travers d'audits, d'échantillonnages, d'analyses spectroscopiques et d'un suivi sur base déclarative des pratiques mises en place.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none"> Pour le calcul de la variation du stock de carbone : Masse de sol Epaisseur de sol Masse des éléments grossiers Carbone organique Pour les émissions d'autres GES : Prise en compte des postes d'émissions et des facteurs associés. 	Delta des émissions des sources identifiées entre la référence et la période de validé du projet (Voir détails des calculs en page 52 de la méthode.)	« National Greenhouse Accounts Factors », publié par le Ministère de l'Environnement et de l'Energie. Protocole d'échantillonnage fournit dans les documents complémentaires de la méthodologie

Pour en savoir plus :

<http://www.cleanenergyregulator.gov.au/ERF/Pages/Choosing%20a%20project%20type/Opportunities%20for%20the%20land%20sector/Agricultural%20methods/The-measurement-of-soil-carbon-sequestration-in-agricultural-systems-method.aspx>

6.2.10. Alberta Carbon offset system – Quantification protocol for conservation cropping: The Conservation Cropping Protocol (CCP)

Usage : Protocole de quantification à destination des porteurs de projets et des exploitants agricoles qui mettent en œuvre des projets de compensation en agriculture de conservation dans les écozones de prairies sèches et de parcs.

Informations générales

Origine : Alberta, Canada

Echelle temporelle : annuelle

Auteur : Alberta Environment and Water, Climate Change Secretariat

GES concernés : CO₂, N₂O, CH₄

Publication : Avril 2012

Applicabilité : écozones de prairies sèches et de parcs.

Type de méthode : basé sur des facteurs d'émission nationaux

Description

Depuis 2007 le gouvernement de l'Alberta encadre les réductions d'émissions imposées aux industries qui émettent plus de 100 000 tonnes de CO₂ éq. /an. Pour cela, un certain nombre de protocoles de quantifications des émissions par secteurs a été établi. Le CPP quantifie spécifiquement les réductions d'émissions résultant des trois activités suivantes :

- Stockage annuel additionnel de carbone dans les sols agricoles
- Réduction des émissions de N₂O provenant des sols gérés sans labour
- Et les réductions d'émissions associées à la baisse de consommation des combustibles fossiles du fait d'un nombre de passages réduit par champ.

Le CPP utilise une méthodologie empirique basée sur des facteurs d'émissions spécifiques à l'Alberta. La quantification passe d'abord par le calcul des émissions totales de la ligne de base (3 ans pré-projet). Ensuite, elles sont soustraites aux émissions totales calculées sur la durée de vie du projet.

Données

A collecter	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none"> • Type d'équipement de travail du sol, les mesures et la date d'achat; • Pratique de gestion du travail du sol utilisé; • Surface du champ; • Type de culture; • Titre de propriété et, le cas échéant, les baux de propriétaire-locataire; • La classification des écozones; • Données d'irrigation (si applicable) • En plus pour les projets avec une jachère d'été, préciser la pratique 	Delta des émissions la ligne de base (ou référence) et la période de validé du projet (Voir détails des calculs en page 30 de la méthode.)	Facteurs d'émissions issus de l'inventaire National Canadien

Pour en savoir plus : <https://open.alberta.ca/dataset/b99725e1-5d2a-4427-baa8-14b9ec6c6a24/resource/db11dd55-ce34-4472-9b8b-cb3b30214803/download/6744004-2012-quantification-protocol-conservation-cropping-april-2012-version-1.0-2012-04-02.pdf>

6.2.11. COOL FARM TOOL

Usage : Outil de calcul des émissions de gaz à effet de serre qui réalise également une évaluation de la gestion de la biodiversité et de la ressource en eau.

Informations générales

Origine : Angleterre

Echelle spatiale : ferme, exploitation agricole

Auteur : Cool Farm Alliance

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Publication: 1^{ère} version en 2010

Applicabilité : tout type de culture (sauf cultures hors sol), prairie, élevage

Type de méthode : document Excel en open-source

Description

L'outil Cool Farm Tool permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone d'une exploitation agricole en fonction de données de pratiques culturales classiques, facilement à disposition de l'agriculteur. Pour les exploitations avec élevage, les calculs sont effectués à partir de la taille du troupeau, de la gestion du fumier, de l'alimentation et de la consommation d'énergie. Cool Farm Tool tient également compte d'une mesure de la biodiversité, qui quantifie la manière dont la gestion de l'exploitation agricole y contribue, et une mesure de l'utilisation de l'eau, pour renseigner les besoins en irrigation des cultures et évaluer les empreintes de l'eau (bleue et verte). La méthodologie de calcul se base sur des facteurs d'émission, un modèle empirique, des équations issues de la littérature ou du rapport du GIEC (Tier 1 ou Tier 2).

Données

A collecter	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">Détails sur la gestion des cultures (type et quantité d'engrais, changement d'usage des terres sur les 20 dernières années ; etc.)Détails sur la gestion de l'atelier élevage (type et nombre d'animaux ; gestion du fumier, régime alimentaire, etc.)Détails sur l'utilisation de l'énergie sur le site	<ul style="list-style-type: none">Émissions de CO₂eq pour l'ensemble de la ferme/ l'exploitation, réparties par source et par GES (exprimé en émissions totales par unité de surface ou par unité de culture)Données d'activité pour l'utilisation de l'énergie	<ul style="list-style-type: none">Emissions de N₂O basées sur un modèle empirique construit à partir d'une analyse de plus de 800 données génériques. Ces ensembles de données affinent les facteurs d'émissions Tier1 du GIEC en tenant compte du taux d'azote minéral appliqué, du carbone du sol, de la texture, de l'humidité et du pH du sol.Les données sur le carbone du sol sont issues de résultats de recherches basés sur plus d'une centaine de jeu de données.

Pour en savoir plus : <https://coolfarmtool.org/>

6.2.12. Carbon Navigator

Usage : Outil de calcul pour une amélioration des performances environnementales dans les exploitations irlandaises avec un élevage bovin.

Informations générales

Origine : Irlande

Auteur : Teagasc and Bord Bia

Publication: 2017

Outil sous-jacent : Facteurs d'émission (Tier1)

Echelle spatiale : échelle de l'exploitation

Echelle temporelle :

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Applicabilité : Exploitations polycultures élevage

Description

A partir des informations entrées par l'agriculteur, l'outil Carbon Navigator compare les performances de l'exploitation agricole considérée avec d'autres exploitations similaires et met en évidence l'impact potentiel sur la réduction des coûts et des émissions de GES des objectifs fixés. L'outil quantifie ainsi les gains environnementaux qui peuvent être réalisés sur la ferme de chaque participant en fixant des objectifs dans des domaines clés tels que la gestion de la saison des pâtures, le taux de vêlage moyen, etc. Chaque agriculteur peut donc examiner lui-même les changements qui peuvent être apportés à son exploitation puis illustrer ce que ce changement en termes de réduction des émissions de GES de son troupeau et de rentabilité financière associée.

Données

En entrée	En sortie	Sources de données
<ul style="list-style-type: none">Données relatives à l'exploitation : sélection du comté, de la région, du type et de la qualité de sol (cela permet d'évaluer la durée de la saison de pâturage)Saisissez la superficie cultivée et pâturéeNombre moyen de vaches allaitantes au temps tNombre moyen de petits d'un an et moins	<ul style="list-style-type: none">Données gestion du troupeau : durée de la saison de pâturage, âge au premier vêlage, taux de vêlage, performances en matière de poids vif, efficacité de l'azote, calendrier d'épandage du lisier	Bases de données nationales agricoles (non précisé)

Pour en savoir plus : <https://www.icbf.com/wp/?p=9091>

6.2.13. CARBON EXPERT

Usage : CARBON EXPERT est un outil de comptabilisation des émissions de GES et des émissions évitées liées à l'utilisation d'un composteur.

Informations générales

Origine : France

Echelle spatiale: territoire

Auteur : Agriculteurs Composteurs de France et Trame

GES concernés: CO₂, N₂O, CH₄

Année de conception: 2009

Applicabilité : exploitations dotées d'un composteur

Type d'outil : empirique, basé de facteurs d'émissions

Description

Démarche similaire à celle d'une analyse de cycle de vie avec une quantification de l'ensemble des flux de matières et d'énergie entrant et sortant sur la vie d'un déchet depuis la collecte à sa valorisation agronomique. Le champ de l'étude s'étale sur 3 principaux postes d'émissions :

-La collecte des déchets

-Le compostage

-La valorisation du compost et des refus de criblage

Les émissions de GES liées à l'activité de compostage qui ont lieu à l'extérieur de la compostière sont également comptabilisées.

La méthodologie n'est pas publique

Pour en savoir plus : Association Trame (Stéphanie Bonhomme s.bonhomme@trame.org)

7. Références bibliographiques

1. Maia Veloso, A. G. Modélisation spatialisée de la production des flux et des bilans de carbone et d'eau des cultures de blé à l'aide de données de télédétection : application au sud-ouest de la France. (Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2014).
2. Pique, G. *et al.* Estimation of daily CO₂ fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *Geoderma* **376**, 114428 (2020).
3. Andriulo, A. E., Mary, B. & Guerif, J. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* **19**, 365-377 (1999).
4. Clivot, H. *et al.* Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environ. Model. Softw.* **118**, 99-113 (2019).
5. Brisson, N. *et al.* An overview of the crop model stics. *Eur. J. Agron.* **18**, 309-332 (2003).
6. Coucheney, E. *et al.* Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environ. Model. Softw.* **64**, 177-190 (2015).
7. Barré, P. *et al.* The energetic and chemical signatures of persistent soil organic matter. *Biogeochemistry* **130**, 1-12 (2016).
8. Cécillon, L. *et al.* A model based on Rock-Eval thermal analysis to quantify the size of the centennially persistent organic carbon pool in temperate soils. *Biogeosciences* **15**, 2835-2849 (2018).
9. Barré, P. *et al.* Quantifying the stable soil organic carbon: towards more accurate soil carbon models? **21**, 14493 (2019).
10. Barré P., Cécillon L., Chenu C., Martin M., Vidal-Beaudet L. et Eglin T., 2020 - La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification, *Etude et Gestion des Sols*, **27**, 305-320 https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/07/EGS_2020_27_Barre_305-320.pdf
11. Delesalle, M. *et al.* ABC'Terre : Integrating soil organic carbon variation into cropping systems greenhouse gases balance at a territorial scale. in *Colloque " Sécurité alimentaire et changement climatique. L'initiative 4 pour mille : un nouveau défi concret pour le sol "* np (2019).
12. Pique G., Fieuzal R., Al Bitar A., Veloso A., Tallec T., Brut A., Ferlicoq M., Zawilski B., Dejoux J.-F., Gibrin H., Ceschia E. (2020) Estimation of daily CO₂ fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *GEODERMA*, **376**, 114428. DOI : 10.1016/j.geoderma.2020.114428

Démonstrateurs territoriaux du stockage de carbone dans les sols – livrable I

Dans le but de participer à l'établissement des mesures effectives et incitatives visant à séquestrer le C dans les sols, ce projet financé par l'ADEME vise tout d'abord à proposer un protocole de mise en place d'une méthode MRV (Monitoring Reporting Verification) d'évaluation du stockage de C à bas coût, robuste, simple dans sa mise en œuvre et replicable dans différents contextes et sur de grands territoires et d'en dessiner les limites. Dans le livrable 1, trois options d'évaluation et de suivi du bilan C possibles sont identifiées, avec différentes méthodologies, outils et données mobilisables ainsi que des recommandations pour le cas particulier des grandes cultures en France. Nous mettons en lumière l'impact des incertitudes des données d'entrées des méthodes MRV sur les estimations de stocks de C et l'intérêt d'aller à terme vers des méthodes incluant la télédétection dans une dynamique de déploiement territorial.

Pour évaluer un projet de stockage de carbone dans les sols en grandes cultures, il est recommandé :

- 1. de s'appuyer sur des outils de modélisation validés scientifiquement (ex : AMG, SAFYE-CO2).*
- 2. de comptabiliser le différentiel de stockage de carbone entre le scénario projet et un scénario de référence, et non le stockage brut.*
- 3. d'évaluer l'ensemble des émissions de GES liées à l'évolution des pratiques.*
- 4. de s'appuyer sur des données satellitaires (ex : Sentinel 2) pour estimer les entrées de carbone par les couverts végétaux et pour orienter les échantillonnages des stocks de carbone dans le cadre de la vérification.*



Centre Siège

147 rue de l'université
75338 Cedex 07
Tél. : +33 1(0) 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/centre-siege>



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE