

**SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT**  
FRANÇAIS / ENGLISH

**METHODES D'ESTIMATION DU STOCKAGE DE CARBONE  
DANS LES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS**

**ETAT DE L'ART ET AVIS D'EXPERTS**

***METHODS FOR ESTIMATING CARBON STORAGE  
IN AGRICULTURAL AND FOREST SOILS***

***STATE OF THE ART AND EXPERTS OPINIONS***

**Septembre 2025**

**V. MOREAUX, G. HOSTYN – GINGER BURGEAP**  
**A. DUPARQUE, J.-C. MOUNY – Agro-Transfert**  
**M. VALE – Auréa**



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Méthodes d'estimation du stockage de carbone dans les sols agricoles et forestiers. Etat de l'art et avis d'experts, 2025, 211p, n°23 0176/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD 2025

## **RESUME**

Les organisations internationales, les gouvernements ou encore les gestionnaires de projets et les parties prenantes (des entreprises privées aux propriétaires fonciers et exploitants agricoles ou forestiers) sont de plus en plus impliqués dans des actions visant à surveiller et mesurer (M) le carbone organique du sol en matière de teneur (COS) ou de stock (SCOS), à rapporter (R) leur quantité et leur évolution potentielle, et enfin à vérifier (V) la séquestration du carbone et la réduction des émissions liées à la gestion des écosystèmes. Ces trois étapes (MRV) sont développées pour rendre compte des efforts réalisés, améliorer la crédibilité des déclarations environnementales et permettre une prise de décision éclairée tout en renforçant la transparence. Ce système est particulièrement pertinent en ce qui concerne l'agriculture du carbone (« Carbon farming », [SWD\(2021\) 450 final](#)).

La présente étude se concentre principalement sur la quantification des COS et des SCOS et de leur évolution, qui peuvent être prises en compte à la fois dans les politiques publiques, les réglementations et initiatives privées portant sur l'agriculture du carbone.

Après une analyse des réglementations et initiatives européennes et nationales liées à cette quantification, l'étude donne un aperçu des méthodologies courantes de mesure du COS et du SCOS depuis le terrain jusqu'à l'analyse en laboratoire, tout en fournissant des réflexions sur les incertitudes associées à ces mesures et les points de vigilance dans leur application. Elle porte également sur l'évolution du COS et du SCOS par les approches de modélisation simulant la dynamique du carbone dans les sols en fonction des pratiques de gestion et des conditions environnementales. Enfin, le rapport traite deux cas d'étude de la quantification du carbone dans les sols et de son évolution qui s'inscrivent *i)* dans l'application de la Directive sur les Énergies Renouvelables RED II ([UE](#) 2018/2001 / Directive RED III ([UE](#)) 2023/2413 et *ii)* dans la labélisation d'un projet « Label bas-carbone ».

Cette étude s'appuie sur l'expertise scientifique croisée des auteurs et sur les conseils d'experts bénévoles de différentes instances françaises (INRAE, I4CE, CNRS).

**MOTS CLES** : Carbone organique du sol, teneur en carbone, stockage carbone, dynamique du carbone, mesures, modélisation, politiques publiques et climatiques, REDII, Label bas-carbone, AMG, combustion sèche, densité apparente, pierrosité, incertitudes.

---

## **SUMMARY**

International organizations, governments and project managers and stakeholders (from private companies to land owners and agricultural or forestry operators) are increasingly involved in actions towards monitoring and measuring (M) soil organic carbon in terms of content (SOC) or stock (SOCS), reporting (R) their evolution, and finally verifying (V) carbon sequestration and carbon emission reduction linked to the management of ecosystems. These three actions (MRV) are developed for ensuring accountability, improving the credibility of environmental claims, and enabling informed decision-making while enhancing transparency. This system is particularly relevant for carbon farming (SWD(2021) 450 final).

The present study focuses mainly on the quantification of SOC and SOCS and their evolution, which can be considered in public policies, regulations and private initiatives concerning carbon farming.

After summarizing European and national regulations and initiatives related to this quantification, this study provides an overview of current methodologies for measuring soil organic carbon content (SOC) and stock (SOCS), from fieldwork to laboratory analysis, while addressing uncertainties associated with these measurements and points to watch out for in their application. It also focuses on the evolution of COS and SCOS using modelling approaches that simulate soil carbon dynamics as a function of management practices and environmental conditions. Finally, the report explores two case studies that use soil carbon quantification and its evolution: *i)* in the application of the Renewable Energy Directive RED II ([EU](#) 2018/2001 / Directive RED III ([EU](#)) 2023/2413, and *(ii)* in the labeling of a low-carbon project with the French certification scheme «Label bas-carbone».

This study is based on the scientific expertise of the authors and the advice of volunteer experts from different French instances (INRAE, I4CE, CNRS).

**KEY WORDS** : Soil organic carbon, carbon content, carbon storage, carbon dynamics, measurement, modelling, public and climate policies, REDII, Low Carbon Label, AMG, dry combustion, apparent density, coarse fragments, uncertainties.

## Contexte de l'étude

Cette étude s'inscrit à la croisée des **avancées scientifiques** sur la connaissance du carbone du sol dans les écosystèmes agricoles et forestiers, de l'**évolution des politiques publiques** ou des cadres législatifs, ainsi que des **stratégies économiques** intégrant progressivement le rôle des sols dans la lutte contre le changement climatique. La mesure et la certification des teneurs et des stocks de carbone organique des sols (COS et SCOS) servent principalement d'outils de suivi et d'évaluation des stratégies de gestion des terres mises en œuvre localement ou des politiques publiques à diverses échelles. Elles deviennent également des leviers de financement de la transition via les marchés carbone et les paiements pour services environnementaux. Ces démarches exigent des approches scientifiques rigoureuses, reposant sur de la mesure *in situ*, de l'analyse en laboratoire souvent combinées à la modélisation empirique ou mécaniste de l'évolution des COS et des SCOS. Dans ce triptyque entre sciences, politique publique et stratégies économiques, l'enjeu majeur demeure d'assurer la crédibilité, la transparence et la traçabilité des estimations de carbone stocké dans les sols ou évité.

## Objectif et plan de l'étude

L'objectif principal de l'étude est de fournir une **évaluation éclairée des méthodologies existantes de quantification du carbone organique des sols, en identifiant les principales sources d'incertitudes** qui limitent leur utilisation dans les dispositifs de certification et de rémunération carbone ou leur traduction opérationnelle dans les textes des politiques publiques et réglementaires. L'étude vise également à proposer des recommandations méthodologiques garantissant la robustesse scientifique et l'équité des rémunérations qui pourraient y être associées. L'étude s'articule ainsi autour de quatre axes : (1) un état des lieux (non exhaustif) des initiatives internationales, européennes et nationales relatives à la mesure et à la certification du carbone des sols ; (2) une analyse critique des approches de quantification, incluant la mesure directe, la modélisation et des approches émergentes complémentaires et prometteuses ; (3) des études de cas illustrant les difficultés et les leviers d'action ; et enfin (4) une mise en perspective des résultats pour formuler des recommandations opérationnelles à destination des porteurs de projet et des décideurs publics et privés.

## Exposé des principaux résultats obtenus

Cette synthèse, fondée sur l'analyse non exhaustive d'une soixantaine de textes, visait à **identifier la place du carbone organique des sols dans les politiques publiques, les initiatives et démarches incitatives ainsi que les stratégies économiques**, qu'elles soient déjà issues ou non de textes réglementaires (Axe 1).

L'analyse met en évidence une évolution marquée de la perception du carbone, d'abord centré sur le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) **comme indicateur d'émissions de gaz à effet de serre et de mesure de l'atténuation**. Depuis le Sommet de la Terre de Rio (1992), où furent adoptées les trois conventions environnementales (CCNUCC, CNULCD et CDB), les sols sont reconnus pour leur importance écologique, mais leur rôle climatique (puits ou source de carbone) **n'est encore ni quantifié ni structuré dans les mécanismes de suivi**. Le Protocole de Kyoto (1997) constitue la première étape où le stockage du carbone dans les sols devient un instrument de politique climatique, notamment via les articles 3.3 et 3.4 reconnaissant les activités liées à l'utilisation des Terres, au

## Context of the Study

*This study stands at the intersection of **scientific advances** in the understanding of soil carbon in agricultural and forest ecosystems, the **evolution of public policies** and legislative frameworks, and emerging **economic strategies** that increasingly incorporate the role of soils in climate change mitigation. The measurement and certification of soil organic carbon contents and stocks (SOC and SOCS) are used primarily as tools to monitor and assess land management strategies implemented at local scales or public policies at various levels. They are also becoming levers for financing the transition through carbon markets and payments for environmental services. These mechanisms require rigorous scientific approaches based on *in situ* measurement and laboratory analyses, often combined with empirical or mechanistic modelling of SOC and SOCS dynamics. Within this triangle of science, public policies, and economic strategies, the core challenge remains to ensure the credibility, transparency, and traceability of soil carbon stock or avoidance emissions estimates.*

## Objective and Study Plan

*The main objective of this study is to provide **an informed assessment of existing methodologies for quantifying soil organic carbon, identifying the main sources of uncertainties** that limit their use in carbon certification and remuneration schemes or their operational translation into public policies and regulatory texts. The study also aims to propose methodological recommendations that ensure scientific robustness and fairness in any associated remuneration. It is structured around four axes : (1) a (non-exhaustive) overview of international, European, and French national initiatives related to soil carbon measurement and certification, (2) a critical analysis of quantification approaches, including direct measurement, modelling, and emerging complementary methods, (3) case studies illustrating challenges and potential leverage points, and (4) a synthesis of results leading to operational recommendations for project developers or public and private decision-makers.*

## Presentation of Main Results

*This synthesis, based on a non-exhaustive analysis of about sixty documents, aimed to **identify the role of soil organic carbon in public policies, incentive schemes, and economic strategies**, whether or not they already stem from regulatory texts (Axis 1).*

*The analysis highlights a clear evolution in the perception of carbon, initially focused on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) **as an indicator of greenhouse gas (GHG) emissions and mitigation efforts**. Since the 1992 Rio Earth Summit, where the three major environmental conventions (UNFCCC, UNCCD, CBD) were adopted, soils have been recognized for their ecological importance, but their climate role (as carbon sinks or sources) **remained neither quantified nor integrated into monitoring mechanisms**. The 1997 Kyoto Protocol was the first milestone in which soil carbon storage became part of climate policy, notably through Articles 3.3 and 3.4, recognizing activities related to Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF). These articles frame GHG emissions and removals from afforestation, reforestation, deforestation, and forest, cropland, and grassland management. Agricultural and forest soils were thus formally incorporated into national carbon accounting. Methodological consolidation came with the IPCC Guidelines (2006) and the recognition of the AFOLU sector*

Changement d'Affectation des Terres et à la Foresterie (UTCATF). Ces articles encadrent les émissions et absorptions de GES issues du boisement/reboisement, du déboisement, de la gestion forestière, agricole et des prairies. Les sols agricoles et forestiers entrent alors officiellement dans la comptabilité carbone des États. La consolidation méthodologique intervient avec les lignes directrices du GIEC (2006) et la reconnaissance du secteur AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use), regroupant UTCATF et Agriculture, afin de représenter et intégrer les flux de carbone entre sols, biomasse et atmosphère. **Après 2015**, année labélisée « Année internationale des sols », la reconnaissance des sols dans les politiques publiques progresse : **le carbone organique des sols est notamment désormais reconnu comme indicateur de santé des sols et de résilience des écosystèmes**, et est au cœur des politiques de gestion durable et de restauration. Cette période récente ajoute alors la dimension de l'**adaptation** aux enjeux environnementaux. Plusieurs textes européens et nationaux décrivent des méthodologies de quantification associée à une échelle donnée, à un secteur donné, et sont analysés dans cette étude : **Règlement (UE) 2018/841 (UTCATF), Règlement (UE) 2018/1999 (Gouvernance), Directive (UE) 2018/2001 (RED II), Règlement d'exécution (UE) 2022/996, Règlement (UE) 2023/839 et Décret n° 2018-1043**. Ils traitent de la mesure *in situ*, des analyses en laboratoire et de la modélisation selon les approches TIER 1 à 3 du GIEC (2006, 2019).

Pour les membres de RECORD, il s'agit d'utiliser ces méthodes de quantification au niveau de détails plus ou moins développés tout en intégrant une gestion du risque d'incertitude et en anticipant les réglementations émergentes. La valorisation du stockage du carbone s'inscrit désormais dans la stratégie de responsabilité sociétale des entreprises (RSE) et dans le reporting ESG, conformément à la directive CSRD. Ces aspects de quantification sont aussi essentiels pour répondre aux attentes croissantes des investisseurs, des consommateurs et de la société dans son ensemble. Une gestion proactive des critères ESG améliore la réputation, la performance durable et la transparence des résultats sur ce critère lié au carbone organique des sols. Dans un contexte où la tonne de carbone réduite, évitée ou stockée acquiert une valeur monétaire sur les marchés réglementaires ou volontaires, l'enjeu majeur reste la crédibilité et la comparabilité des estimations de carbone.

De cette analyse, l'étude souligne la complexité du cadre institutionnel (national, européen), marqué par la coexistence de politiques publiques sectorielles, de dispositifs de financement et de démarches volontaires. La quantification du carbone s'étend à l'ensemble de la chaîne de valeur, intégrant les filières agricoles, forestières et énergétiques. Afin d'accompagner les porteurs de projets dans cette complexité, l'étude propose un schéma structurant et un tableau d'aide à la conduite d'un projet de quantification permettant d'identifier les étapes clés et les questions à se poser. Ce schéma oriente les acteurs vers les outils, ressources et compétences nécessaires. L'objectif n'est pas de fournir une méthode unique, mais un cadre permettant de choisir les approches les plus pertinentes. L'absence de réponse à certaines questions doit mener à l'orientation vers les bons interlocuteurs ou dispositifs d'accompagnement.

Ainsi, cette synthèse met en lumière un mouvement convergent entre science, réglementation et stratégies économiques où la valorisation du carbone organique des sols devient un levier stratégique environnemental et financier, créant le concept « d'agriculture du carbone » (ou « carbon farming »). La reconnaissance de la multifonctionnalité des sols et les exigences croissantes de traçabilité imposent une gouvernance

(Agriculture, Forestry and Other Land Use), which combined LULUCF and Agriculture, reflecting carbon fluxes between soil, biomass, and the atmosphere. **After 2015**, declared as the «International Year of Soils», soils gradually gained recognition in public policies: **soil organic carbon is now acknowledged as an indicator of soil health and ecosystem resilience and is central to sustainable management and restoration policies**. More recent developments also emphasize soil-related climate **adaptation**. Several European and national regulations describing quantification methodologies at specific scales or sectors are analyzed in this study: **Regulation (EU) 2018/841 (LULUCF), Regulation (EU) 2018/1999 (Governance), Directive (EU) 2018/2001 (RED II), Implementing Regulation (EU) 2022/996, Regulation (EU) 2023/839 and French Decree n°2018-1043**. They address *in situ* measurement, laboratory analyses, and modelling following IPCC Tier 1 to Tier 3 approaches (2006, 2019).

For the contracting authorities of this study, the aim is to use these quantification methods with varying levels of detail while integrating risk and uncertainty management and anticipating emerging regulations. Soil carbon storage has now been integrated into corporate social responsibility (CSR) and ESG reporting, in line with the CSRD directive. Quantification aspects are essential to meet the expectations of investors, consumers, and society at large. Proactive ESG management enhances reputation, sustainable performance, and transparency in relation to soil organic carbon. In a context where carbon reductions, avoidance, or storage gain monetary value on regulatory or voluntary markets, the key challenge is credibility and comparability of carbon estimates.

The study highlights the complexity of the institutional framework (national and European), marked by the coexistence of sectoral public policies, funding schemes, and voluntary initiatives. Carbon quantification now extends across entire value chains, including agricultural, forestry, and energy sectors. To help project developers navigate this complexity, the study proposes a structuring diagram and a project-guidance table that identify key steps and guiding questions. The aim is not to provide a single method, but a framework that enables the selection of the most relevant approaches. Missing answers to certain questions should drive actors toward appropriate contacts or support mechanisms.

In doing so, the synthesis highlights a converging movement between science, regulation, and economic strategies, where soil organic carbon valuation becomes both an environmental and a financial strategic lever, creating the concept of «carbon farming». Recognizing the multifunctionality of soils and increasing requirements for traceability call for integrated carbon governance founded on scientific reliability, data transparency, and coherence between policy and economic instruments (e.g. Common Agricultural Policy, Renewable Energy Directive, Soil Monitoring and Resilience Directive, Carbon Removal Certification Framework, and labelling or certification tools).

Drawing on key scientific publications (e.g. Pellerin et al. 2021, Don et al. 2024), existing standards and guidelines (IPCC 2019, FAO GSOC MRV Protocol 2020, NF X 31-100 2020, ISO 23400 2021, etc.), ongoing research, and external expert advice, the study first redefines soil carbon terminology: content, stock, storage, sequestration, stabilization, permanence, flux, emissions, reductions, etc. This component also presents the analyzed methodologies through four sets of summary sheets:

intégrée du carbone, fondée sur la fiabilité scientifique, la transparence des données et la cohérence entre instruments politiques et économiques (notamment : Politique agricole commune, directive sur la durabilité des énergies renouvelables, directive sur la résilience des sols, cadre de certification pour les absorptions de carbone, outils de labélisation ou de certification).

En s'appuyant sur un corpus de publications scientifiques clés (eg. Pellerin et al. 2021, Don et al. 2024), de normes et guides existants (GIEC 2019, GSOC MRV Protocol FAO 2020, NF X 31-100 2020, NF ISO 23400 2021, etc...), de travaux de recherche en cours, ainsi que sur l'avis d'experts, l'étude redéfinit préalablement les termes liés au carbone du sol : teneur, stock, stockage, séquestration, stabilisation, permanence, flux, émissions, réductions (etc...). Cet axe de l'étude décrit également les méthodologies analysées sous forme de 4 fiches synthétiques, comprenant :

- les **prélèvements** et l'**échantillonnage de sols**, en lien avec les guides et normes existants ainsi qu'avec les recommandations dans les textes analysés en Axe 1.
- les **analyses en laboratoires** pour la mesure du COS, incluant les analyses de routine (combustion sèche, oxydation sulfochromique) et les méthodologies émergentes (eg. RockEval®).
- les **incertitudes** et leur propagation, avec un regard sur la détectabilité d'une évolution dans les stocks de carbone du sol.
- la **modélisation** de l'évolution des stocks de carbone, en présentant un panel de modèles mécanistes et l'analyse d'incertitudes associées.

Bien qu'en apparence simple, l'estimation du stock de carbone organique du sol (SCOS) repose sur une équation intégrant plusieurs paramètres : **teneur en carbone organique (COS), densité apparente, profondeur d'échantillonnage et teneur en éléments grossiers, dont chacun est porteur d'incertitudes**. Celles-ci se propagent dans le calcul final, affectant la fiabilité de la mesure. A cela s'ajoute la **variabilité spatiale**, souvent importante à l'échelle intra-parcellaire, notamment dans les milieux forestiers, et qui impose un échantillonnage intensif, parfois de plusieurs dizaines à centaines d'échantillons. Même en recourant à des échantillons composites, la précision des résultats dépend fortement du nombre et de la distribution des prélèvements.

En termes de dynamique, pour interpréter correctement les évolutions du stock de carbone, il est essentiel que les parcelles comparées présentent un état initial équivalent, conformément aux lignes directrices du GIEC (IPCC) et aux cadres réglementaires, qui imposent l'usage de valeurs de référence. Si des bases de données comme les inventaires RMQS ou LUCAS Soil peuvent fournir ces références, la méthode la plus fiable demeure la **mesure directe d'un état initial commun**, accompagnée d'une description pédologique détaillée (profil, texture, oxydes, analyses chimiques) et d'analyses de carbone sur des horizons bien définis. Cette exigence est valable également pour le suivi d'une même parcelle où l'état initial doit être caractérisé *in situ* plutôt que basé sur des valeurs de référence génériques. Par ailleurs, les **dynamiques de stockage étant lentes et de faible amplitude**, la détection statistique de changements significatifs sur moins d'une décennie reste difficile et nécessite un diagnostic de terrain d'un état initial ou de référence potentiellement coûteux mais nécessaire.

La **standardisation des protocoles d'échantillonnage et d'analyse et la continuité de mise en œuvre** sont donc indispensables pour garantir la comparabilité temporelle. Leur application rigoureuse, associée à un contrôle qualité terrain et laboratoire, assure la validité scientifique des données. La

- **soil sampling** and field collection related to existing standards and guidelines and to the recommendations identified in Axis 1;
- **laboratory analyses** for SOC measurement, covering routine methods (dry combustion, Walkley-Black oxidation) and emerging techniques (e.g. RockEval®);
- **uncertainties** and their propagation, with emphasis on detectability of changes in SOC stocks;
- **modelling** of carbon stock dynamics, presenting a range of mechanistic models and associated uncertainty analyses.

Although seemingly simple, estimating soil organic carbon stocks (SOCS) relies on an equation involving several parameters: **SOC content, bulk density, sampling depth, and coarse fragments content, each carrying uncertainties** that propagate into the final calculation. **Spatial variability**, often high even within a single field and especially in forest environments, reinforces the need for intensive sampling, sometimes requiring dozens to hundreds of samples. Even when using composite samples, accuracy strongly depends on the number and distribution of sampling points.

Regarding dynamics, correctly interpreting stock changes requires that compared plots share equivalent initial conditions, in line with IPCC guidelines and regulatory frameworks, which mandate the use of baseline values. Databases such as RMQS or LUCAS Soil can provide such baselines, but the most reliable approach remains **direct measurement of a shared initial state**, accompanied by detailed pedological characterization (profile description, texture, oxides, chemical analyses) and carbon assessments on clearly defined horizons. This requirement applies equally to monitoring a single plot over time, where the baseline should be measured on-site rather than derived from generic values. Moreover, because **SOC changes are slow and modest**, statistically detecting significant differences over less than a decade remains challenging and requires an initial or baseline field diagnosis that may be costly but necessary.

**Harmonized sampling and analytical protocols, consistently applied over time**, are therefore essential for temporal comparability. Rigorous implementation, combined with quality control in the field and laboratory, ensures scientific validity. Operator expertise, the use of certified reference materials, and metrological verification of equipment contribute to reliable results. Laboratories play a central role by ensuring traceability, repeatability, and comparability of analyses, and by participating in inter-laboratory programs that improve accuracy and reduce uncertainties.

**Several emerging quantification methods** are presented (VNIRS, RockEval®, remote sensing), but they are currently used mainly in research. Remote sensing and artificial intelligence, in particular, open promising perspectives for soil carbon quantification. Although not yet operational, they show strong potential. Work by CESBIO, especially via the Agri-Carbon-EO methodology, demonstrates that satellite-based analysis of vegetation cover growth can effectively complement SOC dynamics models, improving precision and spatial resolution of SOCS monitoring.

## Analysis and Commentary on Results

The analysis and discussion build on two case studies:

- Case 1: Directive **RED II** (EU) 2018/2001 and its 2023 update, together with Implementing Regulation (EU)

compétence des opérateurs, l'utilisation de matériaux de référence certifiés et la vérification métrologique des équipements participent à la fiabilité des résultats. Les laboratoires jouent en ce sens un rôle central dans ce dispositif : ils garantissent la traçabilité, la répétabilité et la comparabilité des analyses, tout en participant à des programmes inter-laboratoires qui améliorent la précision et réduisent les incertitudes.

**Plusieurs méthodes émergentes** de quantification sont présentées (VNIRS, RockEval®, Télédétection), mais restent à ce jour quasi-exclusivement utilisées dans un cadre de recherche. L'usage de la télédétection et de l'intelligence artificielle notamment ouvre de nouvelles perspectives pour la quantification du carbone des sols. Bien que ces approches ne soient pas encore opérationnelles, elles offrent un fort potentiel. Les travaux du CESBIO, notamment via la méthodologie Agri-Carbon-EO, démontrent que l'analyse satellitaire de la croissance des couverts végétaux peut compléter efficacement les simulations de modèles de dynamique du COS, renforçant ainsi la précision et la spatialisation du suivi des SCOS.

## Analyse et commentaires de ces résultats

L'analyse et les commentaires associés à l'état de l'art et aux fiches méthodologiques présentées reposent sur la mise en œuvre de deux études de cas :

- Cas 1 : La Directive **RED II** (UE) 2018/2001 et son actualisation 2023/2413 associées au Règlement d'exécution (UE) 2022/996 fixent des critères de durabilité des bioénergies incluant les impacts sur le stock de carbone des sols : application de la modélisation à la filière **méthanisation**.
- Cas 2 : Dispositif incitatif **Label bas-carbone** (Décret n° 2018-1043), adossé à des méthodes de calcul standardisées et vérifiables : application à un projet d'**agriculture bas-carbone** : le Label bas-carbone Grandes Cultures.

Les exemples explorés illustrent la difficulté inhérente à la mesure des stocks de carbone et l'influence très marquée des conditions initiales (ex. nature des sols, climat, pratiques réputées stockantes mises en œuvre, précision des mesures, etc.) sur celle-ci ainsi que des variations à attendre. Ces exemples visent également à positionner le rôle de la modélisation mécaniste, i.e. de TIER 3, en tenant compte des incertitudes du modèle.

### Cas 1. Méthanisation et calcul de l' $e_{SCA}$

L'étude met en évidence la sensibilité du calcul de l' $e_{SCA}$  (**réductions d'émissions dues à l'accumulation du carbone dans les sols**) aux incertitudes liées à la mesure de terrain des stocks de COS (CSR et CSA). Les effets réels des pratiques culturales stockantes, telles que la réduction du travail du sol, se manifestent lentement et souvent dans les horizons superficiels (0-10 cm). La profondeur de 0-30 cm, utilisée dans les protocoles, reste néanmoins pertinente pour le suivi des évolutions à moyen et long terme.

La comparaison des situations étudiées montre que le type de sol influence autant, voire plus, la valeur de l' $e_{SCA}$  que les pratiques culturales elles-mêmes. Sur le terrain, la recherche d'un approvisionnement en biomasse pour la méthanisation ne peut toutefois pas être raisonnée uniquement sur ce critère. Par ailleurs, le calcul de l' $e_{SCA}$  repose sur la dynamique du carbone d'un système de culture complet, incluant des cultures énergétiques et des cultures alimentaires. L'attribution de l' $e_{SCA}$  à l'unité d'énergie produite conduit à créditer les cultures énergétiques de tout le stockage issu du système, y compris celui provenant d'autres cultures de la rotation. Cette approche

2022/996, define bioenergy sustainability criteria including impacts on soil carbon stocks: application to the **biomethane sector**.

- Case 2: The French «**Label bas-carbone**» (Decree n°2018-1043), based on standardized and verifiable calculation methods: application to a **low-carbon agriculture** project (Arable crop systems methodology: LBC-GC).

*The case studies illustrate the inherent difficulty of measuring carbon stocks and the strong influence of initial conditions (soil type, climate, «carbon-sequestering» practices, measurement precision, etc.) on measured values and expected variability. They also clarify the role of mechanistic modelling (TIER 3) while accounting for model uncertainties.*

### Case 1. Methanization and the $e_{SCA}$ calculation

*The study highlights the sensitivity of the  $e_{SCA}$  calculation (emissions reductions due to carbon accumulation in soils) to uncertainties linked to field measurements of SOC stocks (CSR and CSA). Real effects of carbon-sequestering practices, such as reduced tillage, occur slowly and often within shallow horizons (0-10 cm). The 0-30 cm depth used in protocols remains relevant for medium- and long-term monitoring.*

*Comparison of the studied situations shows that soil type influences  $e_{SCA}$  values as much as, or more than, crop management practices themselves. In practice, biomass supply considerations for biomethane production cannot rely solely on this criterion.*

*Moreover,  $e_{SCA}$  calculation reflects carbon dynamics of an entire cropping system, including both energy and food crops. Attributing the entire system-wide carbon storage to the unit of energy produced results in crediting energy crops with storage generated partly by other crops in the rotation, creating an allocation bias. The study therefore recommends revising the  $e_{SCA}$  equation to better distribute each crop's contribution.*

*The calculation also assumes that the reference stock (CSR) corresponds to an equilibrium state. When this is not the case, it becomes difficult to attribute all observed storage to the innovative scenario alone.*

*To overcome these limitations, the study proposes aligning the method with the «Label bas-carbone» for the Arable crop Systems approach (LBC-GC), based on differential modelling of carbon storage (project vs. reference scenario) over 5-10 years. This would enable fairer crop allocation and stronger consistency with MRV requirements.*

*Implementation would rely on:*

- robust simulation models validated with long-term datasets,
- improved SOC stock measurement systems (CSR and CSA),
- satellite technologies to verify crops and biomass,
- continuous  $e_{SCA}$  monitoring on experimental sites,
- technical and human support for farmers, backed by supply chains,
- and attention to the redistribution of benefits among energy-sector stakeholders.

### Case 2. Label bas-carbone: Arable Crops

*The LBC-GC (v1) project illustrates the role of agronomic levers in reducing GHG emissions at the cropping-system scale. Reductions are modest but significant, strongly depending on practices affecting soil carbon inputs. Both the reference and alternative systems (including a cover crop in*

peut générer un biais d'allocation, d'où la recommandation d'une évolution de l'équation du  $e_{SCA}$ , afin de mieux répartir la contribution de chaque culture au stockage de carbone.

Le calcul suppose en outre que le stock initial de référence (CSR) correspond à un état d'équilibre du système de référence. Si ce n'est pas le cas, il devient difficile d'attribuer la totalité du stockage observé au seul effet du système innovant.

Pour pallier ces limites, il est proposé de rapprocher la méthode du calcul Label bas-carbone Grandes Cultures, fondée sur un stockage différentiel modélisé (scénario avec projet vs. scénario de référence) sur 5 à 10 ans. Cette approche permettrait d'intégrer un système d'allocation entre cultures et d'assurer une meilleure cohérence avec les démarches MRV (Monitoring, Reporting, Verification).

L'application d'une telle méthode reposerait sur :

- des modèles de simulation robustes, validés par la recherche sur des séries longues ;
- l'amélioration des dispositifs de mesure des stocks (CSR et CSA) ;
- l'usage des technologies satellitaires pour la vérification des cultures et de la biomasse ;
- un suivi continu de l' $e_{SCA}$  sur dispositifs expérimentaux ;
- un accompagnement technique et humain des agriculteurs, soutenu par les filières.
- la question de la redistribution des bénéfices entre les acteurs des filières énergétiques est également soulevée.

### **Cas 2. Label Bas-Carbone Grandes Cultures**

Le projet LBC GC (v1) illustre le rôle des leviers agronomiques dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle du système de culture. Les réductions observées sont modestes mais significatives, et dépendent fortement des pratiques influençant les apports de carbone au sol.

L'analyse montre que le système de référence et le système alternatif intégrant une culture intermédiaire (Projet 1) présentent tous deux une tendance à l'accumulation de carbone organique, mais plus marqué pour le Projet 1 (+ 6.5 tCOS/ha au bout de 20 ans) et que cette dynamique pourrait varier selon les caractéristiques pédologiques (calcaire, teneur initiale en MOS). La méthode LBC GC apparaît moins sensible aux incertitudes de mesure du sol, car elle repose sur une comparaison de scénarios (avec/sans projet) plutôt que sur des mesures absolues au champ. Cela constitue un avantage majeur par rapport à la méthode  $e_{SCA}$ , fondée sur des différences absolues entre états mesurés à  $t_0$  et  $t_n$ .

Une telle approche encourage les agriculteurs à adopter des pratiques améliorées, même si celles-ci ne conduisent pas immédiatement à un stockage net positif, en valorisant le progrès relatif plutôt que l'absolu. Le renforcement des incitations à poursuivre les efforts vers un sol durablement stockant serait souhaitable, compte tenu des bénéfices agronomiques et écologiques associés.

Enfin, la robustesse du système LBC GC dépend étroitement de la qualité des modèles de bilan humique utilisés (ex. AMG). Ces modèles doivent continuer à être améliorés par la recherche et la R&D afin d'accroître leur précision et leur applicabilité. Même si la modélisation réduit les incertitudes globales par rapport à la mesure directe, celles-ci demeurent liées à la qualité des données d'entrée : rendements, biomasses de couverts, apports organiques, etc.

## **Conclusions**

L'étude met en lumière la **nécessité d'une approche intégrée** combinant rigueur scientifique, pragmatisme opérationnel et **reconnaissance des co-bénéfices environnementaux**. Si la mesure directe du carbone organique du sol reste essentielle, elle doit s'accompagner de protocoles harmonisés, d'outils de

*the project scenario) show a tendency to accumulate SOC, though more strongly in the project system (+6.5 tSOC/ha after 20 years). Dynamics may vary depending on pedological characteristics (calcareous soils, initial SOC levels). The LBC-GC methodology is less sensitive to soil measurement uncertainties because it relies on scenario comparison rather than absolute field measurements, an important advantage over  $e_{SCA}$ , in its actual calculation form. This approach encourages farmers to adopt improved practices even when immediate net storage is limited, by rewarding relative progress. Strengthening incentives to maintain long-term SOC enhancing practices would be beneficial, given their agronomic and ecological advantages. Finally, the robustness of the LBC-GC system depends heavily on the quality of soil organic carbon balance models (e.g. AMG). These models must continue to be refined through research and R&D to increase accuracy and applicability. Even though modelling reduces uncertainty relative to direct measurement, uncertainties remain tied to input data quality (yields, cover-crop biomass, organic amendments, etc.).*

## **Conclusions**

*The study underscores the need for an integrated approach combining scientific rigor, operational pragmatism, and recognition of environmental co-benefits. While direct SOC measurement remains essential, it must be accompanied by harmonized protocols, robust modelling tools, and transparent governance of results and uncertainties. The study, like ongoing research, highlights the substantial uncertainties and difficulty of detecting significant SOC changes. Scientific robustness in carbon-stock change calculations therefore requires long timeframes, extensive sampling, strict protocols, and validated models across varied pedoclimatic contexts. Without these conditions and consistent protocols between baseline and follow-up states (+5, +10, +15 years), using such estimates as the basis for remuneration mechanisms becomes questionable.*

*A comprehensive approach must also recognize the agro-ecological co-benefits of increased SOC: biodiversity, water retention, regulation of the water cycle, erosion control, and climate resilience. Farmers and land managers adopt system changes for multiple benefits, not solely to store carbon. Their decisions incorporate improvements to their farm-level carbon footprint and to the carbon performance of products sold to industry or markets, alongside wider socioeconomic and environmental goals. It is in this broader context that the transition toward low-carbon agriculture will find realistic and lasting pathways. Carbon is a useful but insufficient indicator: overly focusing on it risks overshadowing other benefits and introducing biases. For credible, fair, and effective systems, integrating these co-benefits into broader agro-ecological remuneration schemes is advisable, reducing reliance on complex measurements and supporting a systemic and holistic approach aligned with societal and climate objectives.*

modélisation robustes et d'une gouvernance transparente des résultats et incertitudes. L'étude souligne, au même titre que les recherches en cours, les fortes incertitudes et la difficile détection de changements significatifs du carbone du sol. Garantir la robustesse scientifique d'un calcul d'évolution des stocks de carbone requiert temps long, échantillonnage massif, protocole rigoureux et modèles validés dans différents contextes pédoclimatiques. Sans l'application de ces conditions et sans la continuité de protocole entre un état de référence ou un état initial par rapport à un état ultérieur (+5, +10, +15 ans), fonder les mécanismes de rémunération sur ces estimations peut être contestable.

Une approche complète doit aussi reconnaître les co-bénéfices agroécologiques d'une amélioration des teneurs et des stocks en carbone organique dans les sols : biodiversité, rétention d'eau, régulation du cycle de l'eau, lutte contre l'érosion et résilience climatique. Les agriculteurs et gestionnaires adoptent des changements de systèmes pour des bénéfices multiples, pas seulement pour stocker du carbone. Les changements de systèmes qu'ils peuvent décider d'engager, intègrent notamment une amélioration du Bilan Carbone de leur exploitation et/ou des produits qu'elle permet de proposer aux industriels et de mettre sur les marchés, visant en général aussi d'autres cibles, socio-économiques et environnementales. Et c'est en cela que la transition servant notamment les objectifs du Bas Carbone, trouvera les moyens concrets et réalistes de devenir pérenne. Le carbone est un indicateur utile mais insuffisant : se focaliser sur lui risque d'éclipser d'autres bénéfices et d'introduire des biais. Pour des systèmes crédibles, équitables et efficaces, il est donc judicieux d'intégrer ces co-bénéfices dans des logiques de rémunération agroécologique élargie, réduisant la dépendance aux mesures complexes et valorisant une approche globale, alignée avec les enjeux climatiques et sociétaux.