

# Évaluation du potentiel de séquestration du carbone dans les unités expérimentales : enjeux, méthodologie et état d'avancement

Dorine Bouquet<sup>1</sup>  
Frédéric Huard<sup>1</sup>

## CORRESPONDANCE

[dorine.bouquet@inrae.fr](mailto:dorine.bouquet@inrae.fr)

## RÉSUMÉ

Pour répondre aux enjeux de neutralité carbone et de décarbonation, INRAE doit être en capacité d'évaluer les quantités de carbone absorbées et stockées dans ses sols par an, ainsi que le stockage additionnel issu de la mise en place de pratiques agricoles stockantes. Les approches existantes pour évaluer le stockage du carbone restent à l'heure actuelle peu opérationnelles ou insuffisantes, sans distinction des systèmes et des pratiques.

Un groupe de travail a donc été lancé avec l'objectif de développer une méthodologie pour évaluer le potentiel de séquestration du carbone dans les unités expérimentales (UE), en s'appuyant sur l'expertise scientifique d'INRAE. Cet article vise à présenter les enjeux de la séquestration du carbone aux différentes échelles, dont celle d'INRAE, les pratiques identifiées dans la littérature comme stockantes, la méthodologie utilisée pour évaluer le potentiel de séquestration du carbone dans les sols des unités expérimentales et l'état d'avancement de ces travaux.

Avant de pouvoir évaluer l'effet de l'application des pratiques stockantes sur le stockage du carbone, la première étape est de réaliser le diagnostic du stockage actuel des UE dans les sols et la biomasse. Cette évaluation est en cours sur les parcelles forestières d'INRAE et sur les UE ayant une activité de grandes cultures. Le travail mené montre des enjeux forts autour de la collecte des données et des outils, les modèles qui prennent en compte les pratiques étant encore sur le front de science et par conséquent encore peu opérationnels à l'échelle d'une UE.

## MOTS-CLÉS

Séquestration ; stockage ; neutralité carbone ; expérimentation agricole

---

<sup>1</sup> INRAE, DRSE, 75007 Paris

# Evaluation of carbon sequestration potential in experimental units: challenges, methodology, and progress

Dorine Bouquet<sup>1</sup>  
Frédéric Huard<sup>1</sup>

## CORRESPONDENCE

[dorine.bouquet@inrae.fr](mailto:dorine.bouquet@inrae.fr)

## ABSTRACT

To meet the decarbonation goal, INRAE must be able to assess annual carbon absorption and storage in its soils, as well as the additional storage resulting from the implementation of carbon-storing agricultural practices. However, current methods for evaluating carbon storage remain largely insufficient, as they do not distinguish between different systems and practices.

A working group was established to develop a methodology for assessing the carbon sequestration potential of experimental units (UE), leveraging INRAE's scientific expertise. This article presents the challenges of carbon sequestration at various scales, including INRAE's own, the carbon-storing practices identified in the literature, the methodology used to evaluate sequestration potential in experimental unit soils, and the current progress of this initiative.

Before assessing the impact of carbon-storing practices, the first step is to diagnose current biomass and soil carbon stocks and storage within experimental units. This evaluation is currently underway for INRAE forest plots and experimental units with arable crops. The ongoing work highlights major challenges related to data collection and modeling tools, as models that take into account practices remain at the cutting edge of science but are sometimes difficult to apply at the scale of a single experimental unit.

## KEYWORDS

Sequestration; storage; carbon neutrality; agricultural experimentation

---

<sup>1</sup> INRAE, DRSE, 75007 Paris

## Introduction

La séquestration du carbone est un pilier majeur pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, objectif fixé lors de l'accord de Paris en 2015 (COP21). Processus inverse des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la séquestration du carbone correspond à la captation de CO<sub>2</sub> atmosphérique et à son stockage à long terme dans d'autres réservoirs, sous forme minérale ou organique. Les sols et la biomasse sont connus pour être des puits de carbone naturels, séquestrant le carbone sous forme organique. Les stocks de carbone dans ces compartiments et la capacité de stockage du système dépendent du contexte pédoclimatique, mais aussi de l'usage et des pratiques d'utilisation faites de ces systèmes (voir les définitions dans l'encadré). Dans le secteur de l'agriculture, l'étude « 4 pour 1000 » (Pellerin *et al.*, 2020) a montré que l'adoption à l'échelle nationale de certaines pratiques agricoles dites stockantes, comme la mise en place de cultures intermédiaires, le développement de l'agroforesterie ou la plantation de haies, permettrait d'avoir un important stockage additionnel de carbone des terres agricoles et ainsi, de participer à atteindre la neutralité carbone.

INRAE s'engage à contribuer à l'objectif de neutralité carbone, avec un volet de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et un volet de consolidation de la captation du carbone interne, c'est-à-dire via les puits de carbone naturels que gère l'institut. Avec un vaste dispositif expérimental qui compte des terres agricoles et forestières, INRAE est à part dans l'écosystème des

établissements publics scientifiques et techniques sur la question de la séquestration du carbone, appelé aussi « carbone interne » dans la suite de l'article.

Les bilans des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) réalisés à l'échelle de l'institut ont permis de quantifier les émissions de GES produites par l'activité globale d'INRAE sur une année (+130 000 tCO<sub>2</sub>e émises en 2022) et de construire une trajectoire de réduction jusqu'à un niveau dit incompressible. Cependant, il n'existe actuellement pas de quantification de la séquestration faite dans les sols et la biomasse des terres de l'institut<sup>1</sup>. Pour parer à ce manque et être en capacité de suivre les émissions nettes d'INRAE (émissions brutes – séquestration interne), un groupe de travail a été lancé en juin 2023 pour travailler avec les unités expérimentales (UE) sur l'évaluation de leur potentiel de séquestration. Il est co-animé par la Direction responsabilité sociétale et environnementale (DRSE) et la Commission nationale des unités expérimentales (CNUE)<sup>2</sup>. Piloté par Jean-François Soussana, président du Haut Conseil pour le climat (HCC), jusqu'en mars 2025, puis par Thierry Caquet, nouveau vice-président international d'INRAE, le groupe de travail a pour objectif d'améliorer la quantification des émissions de GES selon les postes, d'évaluer les stockages, actuel et additionnel, de chaque UE, d'identifier les pistes d'action adéquates aux spécificités des UE, et ainsi développer une méthode adaptée aux spécificités des UE. Cet article vise à présenter les enjeux de la séquestration du carbone, de l'échelle mondiale à celle de l'agriculture française, l'état des connaissances sur les pratiques

### Encadré 1. La séquestration du carbone dans les sols : définition des termes

« Le **stock de carbone** est la quantité totale de carbone contenue dans une couche de sol donnée, par unité de surface [à un instant t] » (Pellerin *et al.*, 2020, p. 41.). Ce carbone peut être sous forme organique ou inorganique. Les définitions suivantes concernent le carbone organique du sol (COS).

« La **séquestration de carbone dans le sol** est le retrait net de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère résultant du transfert de son carbone dans des compartiments à temps de renouvellement lent du carbone organique du sol par comparaison à une situation où ce CO<sub>2</sub> serait resté dans l'atmosphère [...] » (Pellerin *et al.*, 2020, p. 43.).

Une autre définition a été proposée récemment dans une revue bibliographique sur les termes utilisés dans les publications. Don *et al.* (2023) propose de définir la **séquestration de carbone** comme processus de transfert du carbone de l'atmosphère vers le sol par l'intermédiaire des plantes ou d'autres organismes, qui est retenu sous la forme de carbone organique du sol, ce qui entraîne une augmentation du stock global de carbone dans le sol.

« Le **stockage de carbone** est l'augmentation du stock de carbone dans le temps. Il est très largement déterminé par deux paramètres : la quantité de carbone entrant qui va alimenter le pool de carbone du sol, et son temps moyen de résidence avant minéralisation. [...] »

Le **stockage additionnel** lié à une pratique agricole B est la différence entre le stock de carbone mesuré dans un sol après la mise en œuvre de la pratique B pendant une période donnée, et le stock de ce même sol sous une pratique de référence A mise en œuvre durant la même période, à partir d'un état initial commun. Le stockage additionnel est donc défini pour deux pratiques, un site donné, et un temps écoulé depuis la différenciation des pratiques [...] » (Pellerin *et al.*, 2020, p. 41).

Il est donc positif lorsque la pratique est stockante. Il peut être négatif en cas de déstockage, mais ces situations sont rarement représentées.

1. On peut faire référence à la séquestration faite dans les sols et la biomasse des terres en utilisant le terme d'émissions négatives.

2. Le groupe de travail est composé d'un représentant de centre, de départements « animal » et « végétal », d'UE, de la CNUE et de la DRSE, et d'experts scientifiques sur les différentes thématiques des GES agricoles et du stockage du carbone dans les sols.

permettant d'augmenter le stockage de carbone dans les sols, et enfin comment ces questions se traduisent au sein de l'institut, avec un focus sur le groupe de travail et la méthodologie utilisée pour évaluer la séquestration du carbone dans les UE. Enfin, nous présenterons l'état d'avancement des travaux.

## Les enjeux de la séquestration du carbone

### La neutralité carbone, un enjeu mondial

La Terre étant un système fermé depuis 4 milliards d'années, les éléments présents sont conservés. Ils se transforment et sont conditionnés par des grands cycles biogéochimiques, tels que le cycle du carbone (Figure 1). Le carbone circule d'un réservoir à l'autre en fonction de processus biologiques, physiques et chimiques, telles que la photosynthèse chez les végétaux, la respiration des organismes ou encore la fermentation.

Depuis la révolution industrielle, la combustion des énergies fossiles et la déforestation libèrent des quantités très importantes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Les systèmes naturels n'étant pas en mesure d'absorber aussi vite cette forte libération de carbone dans l'atmosphère, le CO<sub>2</sub> s'y accumule, s'ajoutant aux émissions d'autres GES. Cela se traduit par une augmentation de la concentration de + 51 % en CO<sub>2</sub> et de + 165 % en méthane (CH<sub>4</sub>) depuis l'ère préindustrielle (WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2024). Cette accumulation de GES dans l'atmosphère provoque une augmentation de la température moyenne sur terre, et de multiples conséquences sur le climat.

L'accord de Paris (COP21) en 2015 engage les 195 pays signataires à limiter l'élévation de la température moyenne mondiale en dessous des + 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Les conclusions du GIEC, mandaté lors de la COP21, montrent que

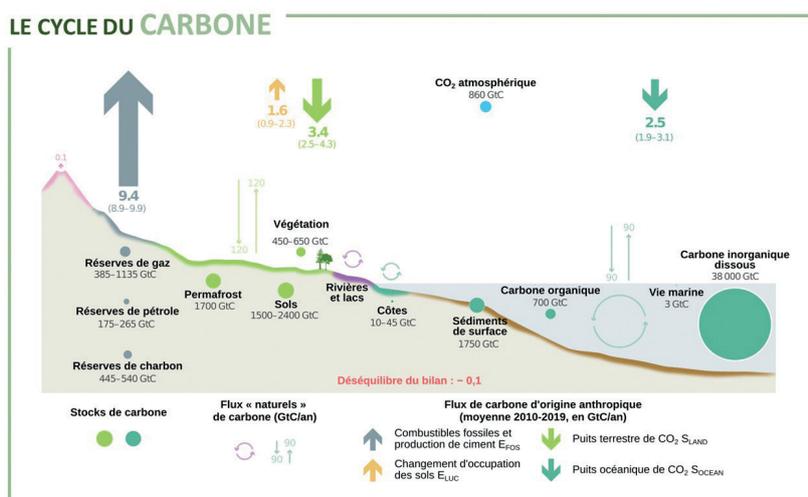
pour respecter cet objectif de limitation du réchauffement climatique, les émissions mondiales doivent **atteindre la neutralité carbone d'ici 2050**.

Pour répondre à cet objectif, des stratégies ont été définies à l'échelle de l'Union européenne, avec le pacte vert, et à l'échelle de la France, avec la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Cette dernière, revue tous les cinq ans, s'appuie à chaque itération sur un scénario de référence. Selon ce scénario qui actionne au maximum les leviers de réduction disponibles (hors paris technologiques), des émissions de GES resteront incompressibles en 2050, notamment dans les secteurs non énergétiques, tels que l'agriculture (Figure 2).

Pour atteindre la neutralité, ces émissions brutes incompressibles devront donc être contrebalancées par des absorptions sur les moyens et longs termes au niveau des puits de carbone, tels que : i/ les écosystèmes gérés par les humains (forêts, terres agricoles, etc.), appelés secteur des terres, ii/ les produits et matériaux fabriqués à partir de matières végétales et issus de la bioéconomie (bois, paille, etc.), et iii/ les procédés industriels (capture et stockage ou réutilisation du carbone ; Figure 3).

### L'agriculture face au changement climatique, un secteur impacté, impactant et à fort enjeu pour la séquestration du carbone

Fortement dépendants du climat et des cycles biogéochimiques, les systèmes agricoles sont directement impactés par les conséquences du changement climatique<sup>4</sup>, en particulier la modification du régime des eaux, la multiplication des événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, fortes précipitations, sécheresses), mais aussi l'augmentation de la population des ravageurs. L'adaptation des systèmes agricoles est un enjeu primordial<sup>5</sup>.

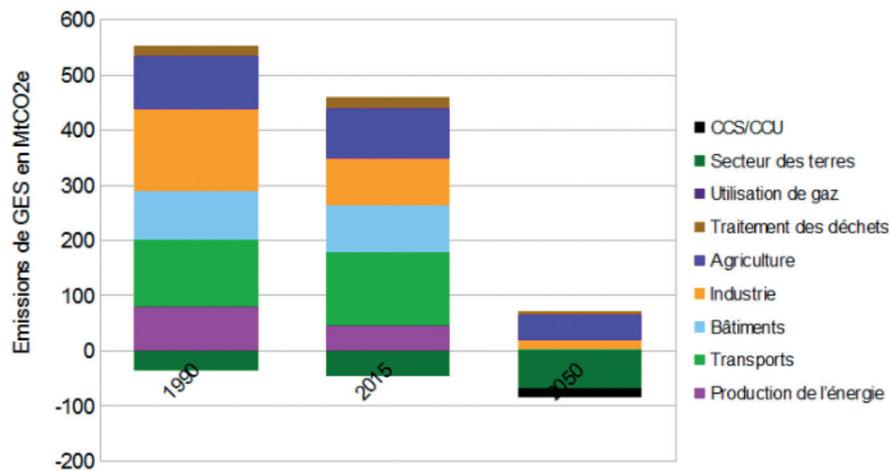


**Figure 1.** Le cycle du carbone<sup>3</sup>. Les stocks de carbone sont représentés par des ronds tandis que les flux de carbone sont figurés par des flèches de différentes couleurs. Rose : volcanisme ; gris : combustibles fossiles et production de ciment ; jaune : changements d'occupation des sols (déforestation principalement) ; vert clair : flux net correspondant à la photosynthèse ; bleu-vert : flux net correspondant à la dissolution du carbone atmosphérique dans les océans (Friedlingstein *et al.*, 2020).

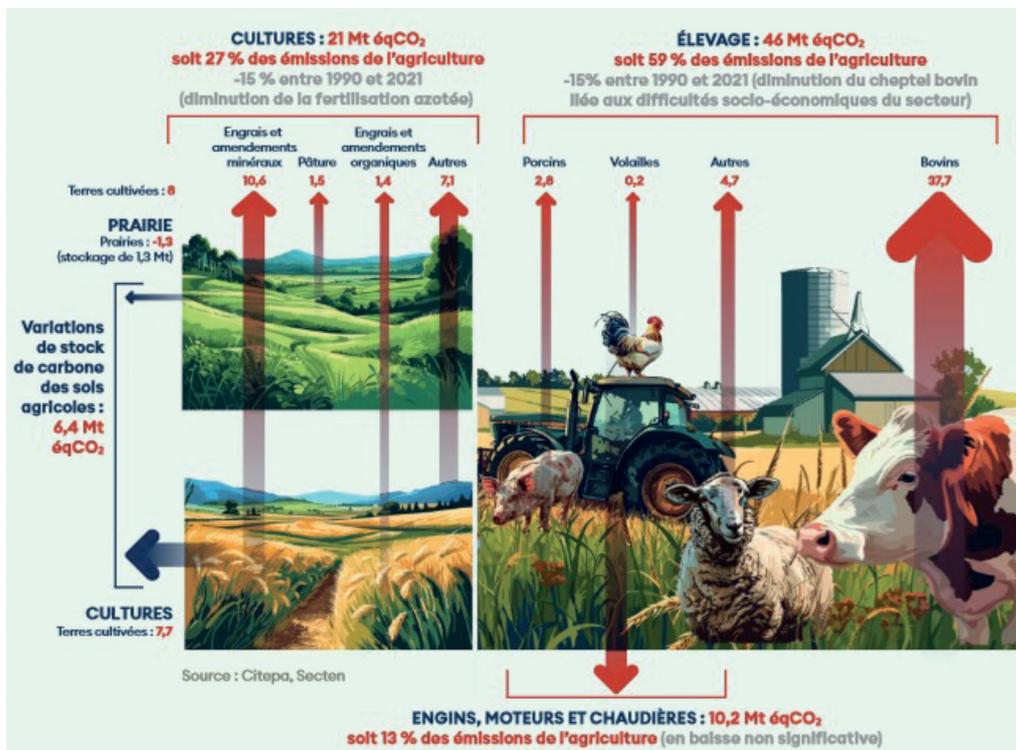
3. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/cycles-biogeochimiques/la-place-des-sols-dans-le-cycle-du-carbone>

4. <https://awa.agriadapt.eu/fr>

5. Leviers techniques d'adaptation des systèmes agricoles : <https://geco.ecophytopic.fr/adaptation-changement-climatique>



**Figure 2.** Évolution des émissions de GES dans le scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS) de la SNBC 2 (en vigueur actuellement) CCS (Carbon Capture and Storage) : capture et stockage de carbone / CCU (Carbon Capture and Use) : capture et utilisation du carbone.



**Figure 3.** Émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture française (flèches en rouge) et des variations de stock de carbone des sols agricoles, dans le secteur Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie ou UTCATF (flèches en bleu) / (Source : Haut Conseil pour le climat, 2023).

L'agriculture a aussi un impact non négligeable sur le changement climatique, elle représente 19 % des émissions nationales de GES en 2022, avec 59 % pour l'élevage et 27 % pour les cultures (Figure 3). Les objectifs fixés par la SNBC 2 sont de réduire ces émissions de 18 % entre 2015 et 2030 et de 46 % entre 2015 et 2050.

La particularité du secteur agricole est que ses émissions sont majoritairement directes et non énergétiques, avec 56 % d'émissions de méthane (CH<sub>4</sub>), principalement liées à l'élevage, et 29 % de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), principalement liées à la fertilisation azotée (Citepa, 2024). Intrinsèques aux processus biologiques,

les émissions de CH<sub>4</sub> sont liées au métabolisme des ruminants, avec la fermentation entérique et celles de N<sub>2</sub>O sont liées aux apports d'azote, élément nécessaire à la croissance des plantes. Ces émissions ne seront donc pas éliminées par la décarbonation de l'énergie ou des transports. Elles peuvent être réduites, mais cela nécessite un changement de pratique ou de système.

Enfin, les sols et la biomasse agricoles sont considérés comme des puits de carbone naturels, grâce à la photosynthèse, « voie quasi unique de fixation biologique du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans les écosystèmes terrestres » (Arrouays *et al.*, 2002). Cependant, il existe une forte variabilité des stocks et du stockage de carbone

selon le contexte pédoclimatique, mais aussi selon l'occupation des sols : stocks de carbone dans les 30 premiers centimètres des sols : sol artificialisé < vigne < vergers = cultures < prairies < forêts (Boton *et al.*, 2023).

Les systèmes agricoles actuels stockent peu de carbone dans les sols. Sur l'année 2021, les sols agricoles ont émis plus qu'ils n'ont stocké (Figure 3), avec un déstockage des terres cultivées (+ 8 MtCO<sub>2</sub>e) et un stockage en prairies (-1,3 MtCO<sub>2</sub>e). Les sols et la biomasse agricoles sont donc des puits de carbone naturels à préserver, pour maintenir le stockage actuel, des prairies et des forêts notamment, et éviter que le carbone déjà stocké ne soit émis dans l'atmosphère, ou à régénérer, pour augmenter le stockage et la séquestration, notamment sur les terres cultivées.

En effet, les pratiques agricoles influent significativement sur le stockage de carbone, et l'adoption de pratiques dites stockantes peut augmenter la séquestration du carbone dans les sols. Le potentiel de stockage est donc fortement dépendant de l'écosystème considéré.

L'agriculture est, ainsi, l'un des secteurs les plus impactés, mais également l'un des plus impactants en termes d'émission et d'absorption de carbone, ce qui fait sa complexité face à l'ensemble des enjeux liés à ce secteur et son importance dans la lutte contre le changement climatique.

## Améliorer le stockage de carbone dans les sols

### Dynamique du carbone dans les sols

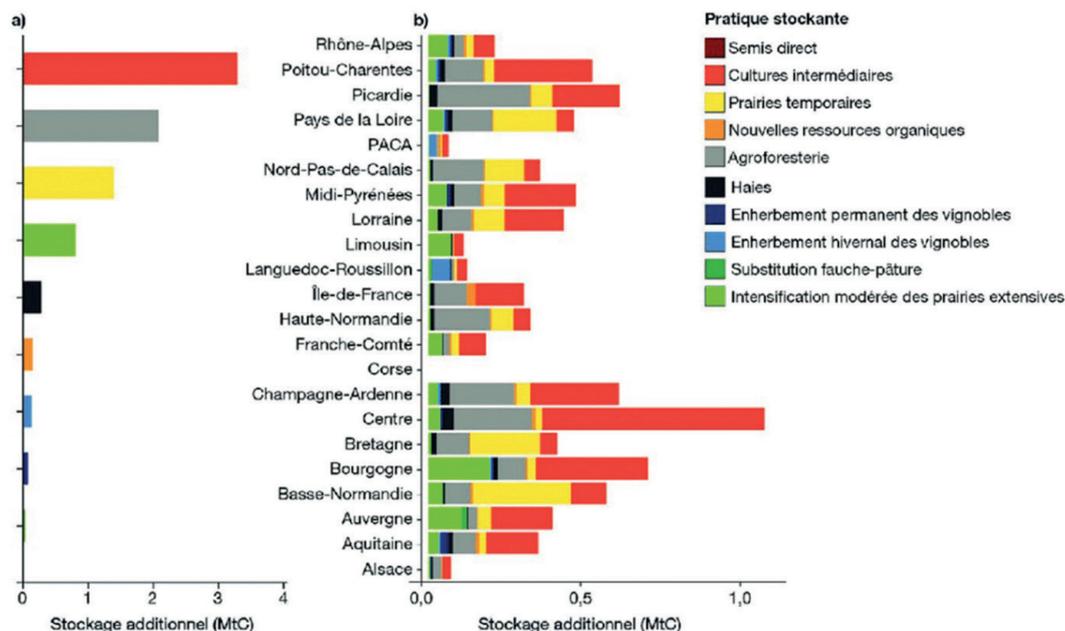
Le carbone se trouve dans le sol essentiellement sous forme organique, et en faible proportion sous forme minérale. Le carbone organique provient des végétaux et organismes morts, des déjections animales, mais aussi de molécules organiques excrétées par les racines. La matière organique « morte » entrant dans le système sol subit plusieurs processus de dégradation libérant du CO<sub>2</sub> : une première phase de décomposition, processus rapide, puis une phase plus lente de minéralisation par des micro-organismes. L'évolution du stock de carbone est déterminée par le bilan entrée de matière organique/sortie de CO<sub>2</sub> » (extrait d'Arrouays *et al.*, 2002, p. 6). Les deux moyens d'augmenter le stockage de carbone dans les sols sont d'accroître les « entrées » de matière organique et de retarder les « sorties » par minéralisation.

### Les leviers pour améliorer le stockage de carbone dans les sols agricoles

Certaines pratiques agricoles sont reconnues comme des pratiques permettant d'augmenter le stockage de carbone dans le sol. L'étude « 4 pour 1000 » (Pellerin *et al.*, 2020) a sélectionné,

**Tableau 1. Stockage additionnel et coût unitaire technique des pratiques dites stockantes étudiées dans l'étude « 4 pour 1000 » (données issues de Pellerin *et al.*, 2020)**

Occupation des sols	Stocks de carbone (tC/ha)	Stockage moyen (kgC/ha/an)	Pratiques stockantes étudiées	Stockage additionnel (kg C/ha/an)	Coût unitaire technique (€/ha/an)
Écosystèmes forestiers	81,0	+ 240	Pas de pratiques identifiées plus stockantes qu'actuellement	-	-
Prairies permanentes	84,6	+ 50	Intensification modérée des prairies extensives	+ 176	28
			Exploitation de l'herbe par pâturage plutôt que par fauche	+ 265	73
			Mise en place ou allongement des cultures intermédiaires	+ 126	39
			Accroissement de la part des prairies temporaires dans les successions culturales	+ 114	91
Grandes cultures (y compris prairies temporaires)	51,6	- 170	Apport de nouvelles ressources organiques	+ 61	- 52
			Développement de l'agroforesterie intraparcélaire (parcelles > 1 ha et profondeur du sol > 1 m)	+ 207	118
			Plantation de haies sur les terres arables, autour de parcelles ou d'îlots de parcelles d'au moins 8 ha	+ 17	73
Cultures pérennes	na	na	Enherbement des inter-rangs en vignoble, permanent ou hivernal	+ 182	- 26 - 15



**Figure 4.** Contribution des pratiques au stockage additionnel maximal calculé sur le territoire français hexagonal (à gauche) et au niveau régional (à droite) (Source : Pellerin *et al.*, 2020).

à partir d'une synthèse de la littérature, les pratiques dites stockantes avec les plus forts potentiels à l'échelle nationale et étudié le stockage additionnel associé au changement de pratique et leur coût de mise en œuvre à l'échelle régionale. Le tableau 1 reprend les résultats principaux.

Le potentiel de chaque levier (Figure 4) dépend du stockage additionnel apporté grâce à la mise en œuvre de cette nouvelle pratique, mais aussi de l'assiette technique<sup>6</sup> de mise en œuvre. Par exemple, l'agroforesterie, qui présente un stockage additionnel élevé (+ 207 kg C/ha/an), n'a été appliquée que sur les parcelles faisant plus de 8 ha, et présentant un sol de plus d'un mètre de profondeur, ce qui limite l'assiette. L'extension des cultures intermédiaires, avec un stockage additionnel moindre (+ 126 kg C/ha/an), présente une assiette technique étendue, quasiment l'ensemble des surfaces de grandes cultures (introduction de cultures intermédiaires, augmentation de leur fréquence dans les successions culturales ou encore allongement de leur durée), ce qui explique le fort stockage additionnel potentiel à l'échelle hexagonale.

Les pratiques à mettre en œuvre pour augmenter le stockage de carbone dans les sols apportent aussi des co-bénéfices vis-à-vis de la fertilité du sol mais aussi de la qualité de l'eau, de la biodiversité et de l'érosion des sols.

## INRAE : quelle contribution à la neutralité carbone en 2050

### Objectifs et suivi

Avec sa stratégie bas carbone, INRAE s'est engagé à contribuer à l'objectif national de neutralité carbone à l'horizon 2050 par :

- la réduction des émissions de GES jusqu'à l'horizon 2050, en suivant une trajectoire de décarbonation cible qui respecte les objectifs nationaux ou internationaux sectoriels et vise un niveau d'émissions incompressibles en 2050 de l'ordre de 45 000 tCO<sub>2</sub>e/an ;
- l'augmentation de la séquestration interne du carbone, c'est-à-dire la consolidation du stockage de carbone dans les sols et la biomasse sur le périmètre de l'institut, afin de réduire au maximum les émissions nettes ;
- l'identification des leviers de compensation des émissions résiduelles suite à la mise en œuvre des deux premiers niveaux d'action, le niveau de compensation à atteindre restant à définir.

Par son activité expérimentale de terrain, l'institut gère un grand domaine de terres agricoles et forestières qui, en 2021, représentaient 7 140 ha de surface agricole totale dont 6 407 ha de surface agricole utile. L'assolement INRAE (Figure 5) compte :

- 53 % de prairies et bois, des puits de carbone qui présentent **des stocks de carbone élevés et un stockage significatif** (Pellerin *et al.*, 2020), avec des enjeux de préservation mais aussi d'adaptation ;
- 47 % de cultures annuelles et pérennes, **des puits de carbone qui peuvent être consolidés** en adoptant des pratiques qui permettent d'avoir un stockage additionnel de carbone dans ces sols.

Pour répondre à cet engagement, INRAE doit être en capacité d'évaluer les **stocks de carbone dans le dispositif expérimental**, le **stockage de carbone actuel**, ce stockage étant fortement lié aux pratiques utilisées sur les systèmes et le **potentiel de stockage additionnel** du dispositif suite à un changement de pratiques (voir la définition complète dans l'encadré).

6. Surface sur laquelle peut être appliquée la pratique.

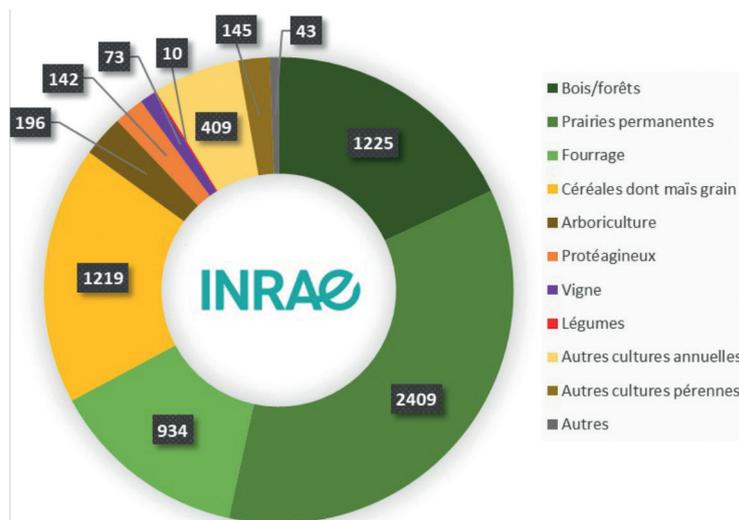


Figure 5. Assolement des surfaces agricoles utiles (en ha) gérées par INRAE (à partir des données 2021 de la CNUE)

## Absence de méthode opérationnelle pour quantifier le stockage de carbone dans les sols

Selon la littérature, INRAE présente donc un potentiel de séquestration de carbone intéressant, ainsi qu'un enjeu d'exemplarité sur les thématiques liées à l'agriculture.

Comme pour le volet émissions, avec les BEGES de l'institut, le diagnostic du stockage du carbone sur le périmètre de l'institut servirait à suivre l'évolution de ce stockage, et ainsi quantifier les émissions nettes d'INRAE et les émissions à compenser. Toutefois, les méthodes de diagnostic de la séquestration du carbone sont actuellement limitées. L'utilisation de valeurs de stock et de stockage de référence ne permet pas de faire un diagnostic adapté aux activités d'INRAE. Les méthodes actuelles (UTCATF ; ALDO<sup>7</sup>) n'incluent pour le secteur agricole que les flux (émissions et séquestration) liés aux changements d'occupation des sols. Les pratiques utilisées ne sont pas prises en compte à l'heure actuelle. La méthode Bilan Carbone<sup>®</sup>, développée par l'ADEME et utilisée à l'échelle d'INRAE, ne quantifie que les émissions brutes et ne couvre pas l'ensemble du secteur des terres (UTCATF ; Citepa, 2020), tout comme d'autres outils d'évaluation développés par des instituts techniques agricoles. L'utilisation de ces méthodes et outils ne permet pas de voir l'impact d'un changement de pratiques sur le stockage de carbone du système.

## Suivre la capacité de stockage de carbone interne à INRAE

### Méthode de travail et état d'avancement

Le périmètre de l'étude a été défini, ainsi seules les activités agricoles (expérimentales ou non) sont considérées. La figure 6 représente les grandes étapes de la méthodologie de travail proposée et suivie par le groupe de travail pour évaluer le potentiel de sé-

questration de carbone dans les unités expérimentales.

Le groupe de travail a débuté par un inventaire des outils existants (GES agricoles et séquestration) internes ou externes à INRAE, qui a montré que les outils externes sont peu adaptés aux objectifs internes. Ils ne prennent pas en compte les pratiques et ne permettent pas de modifier le formalisme (méthode de calculs) de l'outil et donc sa mise à jour en fonction des avancées scientifiques sur les facteurs d'émission. De plus, le modèle le plus largement utilisé dans ces outils pour le stockage de carbone dans les sols est le modèle AMG, développée depuis 1999 par INRAE. Le groupe de travail a donc décidé de travailler avec les modèles et outils internes d'INRAE, dont AMG.

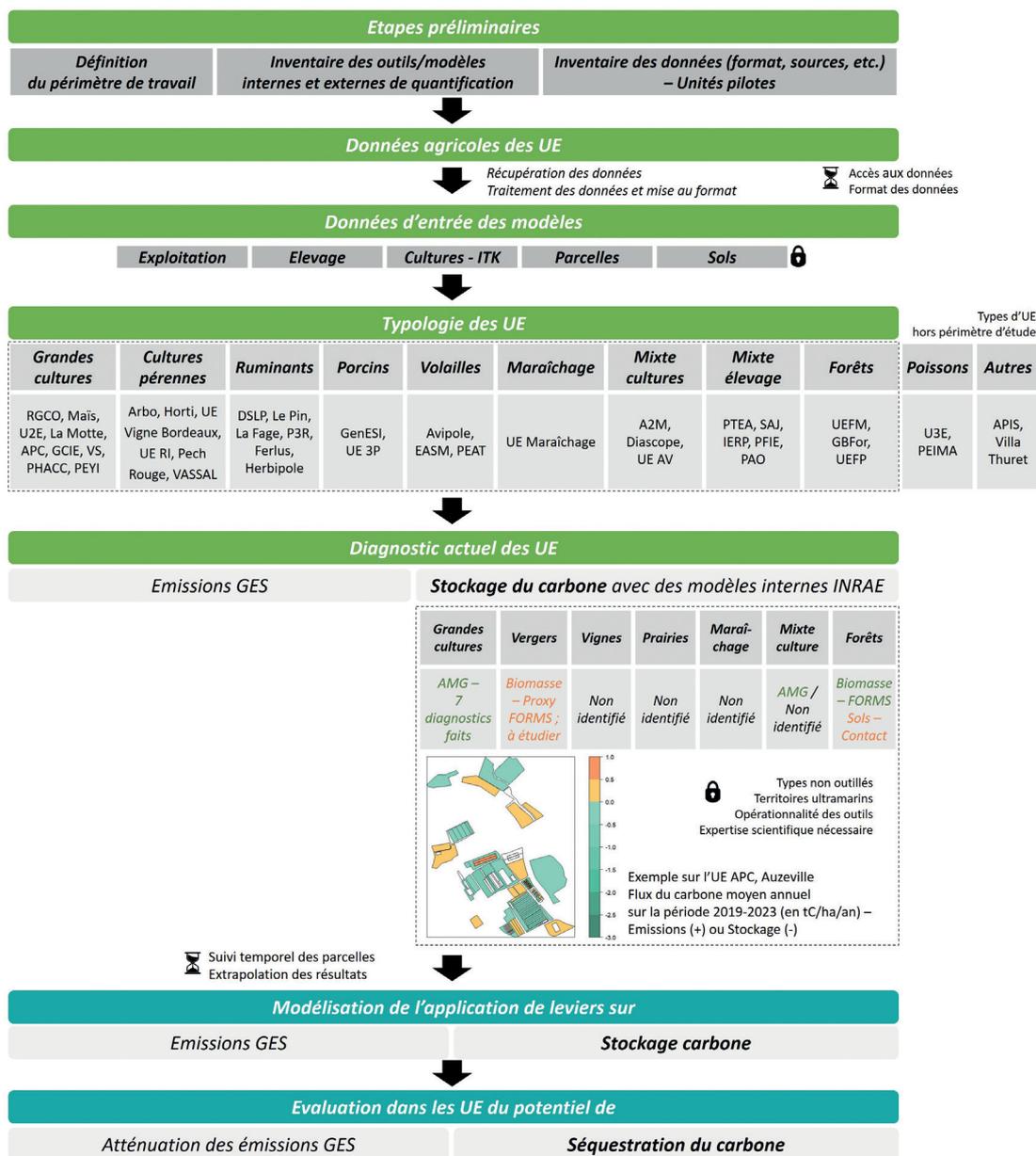
Les outils et modèles existants étant spécifiques à une activité, une typologie a été réalisée sur l'ensemble des UE, en fonction des ateliers agricoles présents (Figure 6). Pour chaque type défini, le groupe de travail s'est employé à identifier les outils ou modèles internes permettant de quantifier les émissions de GES agricoles ou le stockage de carbone (Figure 6), dont le modèle AMG pour le carbone dans les sols de grandes cultures (Clivot *et al.*, 2019) ou encore les cartes issues de FORMS pour les forêts (Schwartz *et al.*, 2023).

### Evaluation du stockage actuel de carbone dans les sols de grandes cultures

Une première phase d'évaluation de la séquestration de carbone a été lancée avec ce modèle AMG sur des unités pilotes : grandes cultures dans l'UE de La Motte en Ille-et-Vilaine, UE d'agroécologie et de phénotypage des cultures (APC) en Haute-Garonne et ruminants/bovins lait dans l'UE du Pin dans l'Orne.

Plusieurs données ont été collectées auprès des UE : parcellaire, itinéraires techniques (ITK ; fertilisation, travail du sol, récolte, semis, cultures intermédiaires, traitements, etc.) extraits depuis

7. <https://aldo.territoiresentransitions.fr/>



**Figure 6.** Schéma de la méthodologie proposée par le groupe de travail pour évaluer le potentiel de séquestration de carbone dans les UE, avec l'état d'avancement des différentes étapes (vert : faite ou en cours ; bleu : à venir)

les systèmes de gestion des parcelles des unités pilotes (Geofo- lia, Mes Parcelles), et analyses de sol (données du réseau CAREX<sup>8</sup>, analyses agronomiques).

Via une programmation sur R, les données ont été extraites à partir des fichiers bruts fournis par les UE et mises au format des données d'entrée du modèle AMG. Elles ont ensuite été utilisées avec le script AMG R (version 2 ; Clivot *et al.*, 2019), en comparant les parcelles par couple d'années. Les parcelles étant difficiles à suivre dans le temps (leurs noms ont été changés d'une année sur l'autre et elles ont été découpées pour les expérimentations), les données ne permettent pas d'obtenir rapidement

des quantifications pour l'ensemble des parcelles d'une UE. Un travail supplémentaire d'homogénéisation des données sur les années d'étude permettrait d'améliorer ce point, mais nécessite la connaissance du terrain et de son historique. De même, une meilleure caractérisation des sols et de l'état initial pour la modélisation améliorerait le diagnostic.

Les résultats sont en cours d'expertise et de validation par l'expert du groupe de travail en carbone du sol, Fabien Ferchaud (UMR Éco&Sols). Les diagnostics de stockage actuel du carbone avec AMG R (version 2) ont été réalisés sur 7 UE avec des grandes cultures (UE La Motte ; APC ; Le Pin ; P3R ; RGCO ; PHACC ; UE Maïs).

<sup>8</sup> CAREX est un réseau de 13 unités expérimentales conduisant des essais en productions végétales. L'axe du projet est de caractériser l'environnement de ces essais, dont les sols.

## Evaluation du stockage actuel de carbone dans la biomasse forestière d'INRAE

Le carbone dans la biomasse forestière est en cours d'évaluation. En collaboration avec Clément Battista et Jean-Pierre Wigneron (UMR ISPA), la carte des parcelles forestières d'INRAE, produite par Antoine Savoie (1297 UE PAO), a été intersectée avec les cartes issues de FORMS, des cartes à sources multiples de hauteur forestière, de volume de bois et de biomasse forestières en France à une résolution de 10 à 30 mètres basées sur les données Sentinel-1, Sentinel-2 et GEDI (Schwartz et al., 2023). Cette méthode inédite permet de quantifier la biomasse forestière aérienne et souterraine, qui est ensuite convertie en quantité de carbone. Les résultats sont en cours de traitement.

Le groupe de travail n'a pour l'instant pas identifié de modèles transférés en outils opérationnels pour les prairies, les vignes et le maraîchage, mais poursuit sa recherche.

## Suite et perspectives

Le travail en cours permet d'évaluer le stockage actuel des UE dans les sols de grandes cultures, mais pas encore le potentiel de stockage additionnel, c'est-à-dire le stockage supplémentaire que permettrait l'adoption de pratiques dites stockantes. Une des problématiques de l'étude est que les leviers connus dans la littérature sont difficilement applicables par les UE en raison des fortes contraintes sur les expérimentations. Par exemple, la fertilisation azotée des cultures, en général fixée par les protocoles expérimentaux, souvent sous forme d'azote minéral, est plus prévisible. Sans adaptation de ces protocoles, les UE ont peu de marge de manœuvre sur le périmètre des expérimentations. Toutefois, un travail d'étude de l'applicabilité de ces leviers sur le périmètre hors expérimental des UE a été initié.

L'absence d'outils et de modèles pour certains types de végétation (prairies, haies, espaces verts, vignes) soulève la question de la représentativité du stockage de carbone dans les sols de grandes cultures, dans les forêts et les vergers par rapport à l'ensemble des puits des UE et d'INRAE et de l'intégration de ces résultats dans la trajectoire bas carbone. La collecte de données et l'existence d'outils opérationnels restent les enjeux principaux de ce travail d'état initial et de monitoring.

## Conclusion

Pour calculer ses émissions nettes ou un ratio absorptions/émissions, INRAE devra être en capacité d'évaluer, en parallèle des émissions de GES annuelles, le stockage de carbone annuel interne, afin de mesurer pleinement sa contribution à la neutralité carbone, et éventuellement permettre de construire une trajectoire de séquestration et de compensation pertinente. Les méthodes existantes ne permettant pas de distinguer les systèmes et les pratiques, et donc de suivre l'impact de la mise en place de pratiques stockantes, le groupe de travail UE bas carbone a été constitué avec l'objectif d'évaluer ce stockage dans les sols et la biomasse des UE et le potentiel de séquestration qui serait associé à des modifications de pratiques. Le stockage de carbone dans les sols d'UE avec grandes cultures a été évalué grâce au modèle AMG v2 sur des unités pilotes, puis étendu à l'ensemble du périmètre grandes cultures d'INRAE. Le stockage de carbone dans la biomasse forestière d'INRAE est en cours d'évaluation via l'utilisation conjointe des cartes FORMS et des parcelles forestières d'INRAE. Les résultats sont en cours d'expertise et de validation. Les outils pour les autres types de culture restent encore à identifier. Se posera ensuite la question de l'évaluation du potentiel de stockage des UE, en appliquant les leviers connus dans la littérature sur l'assiette technique disponible à INRAE, assiette à définir. L'enjeu majeur à INRAE est d'adopter ces pratiques dites stockantes, tout en maintenant un niveau de qualité expérimentale élevé.

Face à la nécessité d'agir, le groupe de travail a également lancé une démarche semi-quantitative de diagnostic des pratiques. Cette démarche, ne nécessitant pas de quantification des GES et de la séquestration, permettrait d'accompagner les UE dans la transition via l'utilisation de l'outil StopGES expérimentations agricoles, un outil d'aide à la décision qui se base sur un diagnostic des activités et des grandes pratiques, pour identifier les pistes d'action bas carbone qui pourraient être incluses dans leur plan d'action d'unité ou identifier comme telles celles qui sont déjà incluses dans le cadre d'autres démarches (par exemple la réduction de la consommation de gazole non routier (GNR)). ■

# Références

- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.-C., Jayet P.-A., Soussana J.-F., Stengel P. (2002). *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA*. 334 p.
- Boton Xavier, Nitschelm Laure, ARVALIS - van der WERF Hayo. INRAE - (Gis Revalim) (2023). *Variations de stock de carbone organique du sol en analyse du cycle de vie - Agribalyse - Projet ACV Carbone*. 52 pages. p7.
- Citepa (2020). *Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et des forêts. Émissions des gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques de France*. Rapport Secten.
- Citepa (2024). *Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France | 1990-2023*. Rapport Secten éd. 2024. <https://www.citepa.org/donnees-air-climat/donnees-gaz-a-effet-de-serre/secten/>
- Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., Mary B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling and Software*, 118, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Don A., Seidel F., Leifeld J., Kätterer T., Martin M., Pellerin S., Emde D., Seitz D., Chenu C. (2024). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation. Definitions and pitfalls. *Global Change Biology*. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>
- Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., Andrew R. M., Hauck J., Olsen A., et al. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Haut Conseil pour le Climat (2024). *Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste*. Version grand public, Résumé du rapport thématique du Haut conseil pour le climat. 12p.
- Pellerin S. et Bamière L. (pilotes scientifiques), Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., et al. (2020). *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude*, INRA.
- Schwartz M., Ciais P., De Truchis A., Chave J., Otlé C., Vega C., Wigneron JP., Nicolas M., Jouaber S., Liu S., Brandt M., Fayad I. (2023). FORMS: Forest Multiple Source height, wood volume, and biomass maps in France at 10 to 30 m resolution based on Sentinel-1, Sentinel-2, and GEDI data with a deep learning approach. [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7840108>
- WMO Greenhouse Gas Bulletin (2024). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. Collections Greenhouse Gas Bulletin, no 20. <https://library.wmo.int/idurl/4/69057>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.