

Avec le soutien de

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE

Liberté
Égalité
Fraternité



Resp^{haies}

Rapport n°3

Évaluation des stocks et flux de biomasse et carbone des haies

Partie 2 :

Évaluation du potentiel de stockage additionnel de carbone
dans les sols

Rapport final — Mai 2023



Auteurs :
Valérie Viaud – INRAE
Lucas Lesaint – INRAE

Table des matières

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF	3
1.1 — Problématique	3
1.2— État de l'Art	3
1.2.1— Éléments généraux sur le stockage de carbone dans les sols	3
1.2.2 — Références disponibles sur le stockage de C dans les sols au voisinage des haies	4
1.2.3 — Méthodes utilisées pour quantifier les stocks additionnels de C dans les sols au voisinage des haies	5
1.3 — Objectifs	5
PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS	7
2.1 – Méthodologie	7
2.1.1 — Sites d'échantillonnage retenus	7
2.2 — Stratégie d'échantillonnage mise en œuvre sur chaque site	8
2.3 — Analyses de sol	9
2.4 — Calcul des stocks additionnels de C au voisinage des haies	10
2.5 — Simplifications de la méthode de mesure envisagées	10
2.6 – Déroulé du projet	11
2.6.1 – Organisation mise en place	11
2.6.2 – Étapes	12
3.1 — Stocks de référence dans les sites échantillonnés	14
PARTIE 3 – RESULTATS	14
3.2 — Validation d'un effet des haies sur le stockage de C dans les sols	15
3.3 — Impact d'un allègement de la méthode de mesure sur l'estimation du stockage additionnel de C dans les sols au voisinage des haies	17
3.3.1 — Limitation de l'échantillonnage à 1 et 10m de la haie	17
3.3.2 — Limitation de l'échantillonnage aux 30 premiers centimètres de sol	17
3.3.3 — Estimation de la densité apparente au moyen de fonctions de pédotransfert	18
3.3.4 — Impact des simplifications du protocole sur les coûts	20
3.4 – Discussion des résultats	20
3.5 – Liste et descriptif des livrables	22
PARTIE 4 – PERSPECTIVES	23
4.1 – Suites envisagées	23
4.2 – Éléments évaluatifs	23
4.2.1 – Difficultés rencontrées	23
4.2.2 – Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles	23
4.2.3 – Indicateurs de suivis	23
4.2.4 – Indicateurs de résultats	24
PARTIE 5 – ANNEXES	25
Bibliographie	25

PARTIE 1 — PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF

1.1 — Problématique

La plantation et le maintien de haies bocagères sont des moyens avancés pour stocker davantage de carbone (C) dans les parcelles agricoles, dans la biomasse mais aussi dans le compartiment sol. Néanmoins peu de données disponibles permettent de quantifier effectivement le stockage additionnel qu'elles permettent. Il est donc intéressant pour poursuivre la reconnaissance du carbone stocké par les haies de proposer un protocole d'estimation du potentiel de stockage additionnel de carbone (C) dans les sols, lié aux haies, à partir de mesures sur le terrain, qui puisse être appliqué pour une évaluation sur le territoire national.

1.2 — État de l'Art

1.2.1— Éléments généraux sur le stockage de carbone dans les sols

Le **C organique du sol n'est pas un compartiment statique**, il se renouvelle continuellement : le stock de C organique présent dans le sol résulte du bilan entre les flux de C entrants dans le sol et les flux de carbone sortants (Figure 2.1). Les **flux de carbone entrants** sont pour l'essentiel constitués des apports par les résidus végétaux aériens et racinaires : résidus de culture et racines laissés au sol dans les parcelles agricoles ; litière, végétaux morts et racines en milieu non cultivé ou forestier. Dans le sol, le C organique est progressivement décomposé et minéralisé par les micro-organismes du sol sous forme de CO₂ principalement. Les **flux sortants de C** sont donc les flux de minéralisation. Le stock de C du sol augmente lorsque les flux d'apport au sol sont supérieurs aux flux de minéralisation. Le temps moyen de résidence du C apporté au sol est d'une dizaine d'années (Balesdent et Recous, 1997).

Mais les vitesses de biodégradation du C dans le sol sont très hétérogènes. Elles dépendent notamment, du type de sol et du climat, de la nature des composés carbonés, mais aussi des processus de protection physique ou biochimique des composés dans le sol.

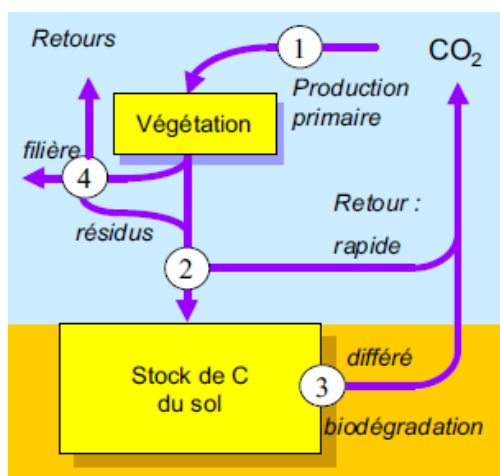


Figure 2.1. Stockage de C dans le sol, résultante des flux de C apportés au sol et des flux de biodégradation du C du sol. Les vitesses de minéralisation diffèrent le retour du C vers l'atmosphère ; leur ralentissement provoque un stockage (d'après Arrouays, 2002).

Les haies peuvent avoir des impacts sur le stockage de C dans le sol, via leurs impacts directs sur les flux de C entrants et sortants du sol :

Les arbres contribuent à enrichir le stock de C organique du sol grâce aux apports de litière aérienne, mais également grâce à la restitution de C en profondeur via le turnover des racines fines et la libération d'exsudats racinaires (Upson and Burgess, 2013).

Le C organique apporté par la végétation ligneuse est plus récalcitrant et se dégrade plus lentement que le carbone apporté par des résidus végétaux herbacés (Recous et al., 2008).

Les conditions de température et d'humidité du sol sous les arbres ou à proximité, ainsi que l'absence de travail du sol sur la ligne d'arbres, limiteraient aussi la vitesse de minéralisation de la matière organique des sols (Pellerin et al., 2013).

Enfin, dans le cas de haies situées parallèlement aux courbes de niveau ou en rupture de pente, la haie peut constituer un obstacle à l'érosion des sols : les particules de sol érodées en amont provenant de l'horizon de surface du sol, peuvent s'accumuler en amont (Walter et al., 2003). Pellerin et al. (2013) mentionne qu'il s'agit plutôt là d'une redistribution du C organique du sol dans le paysage ; en l'absence de haie, le C associé aux particules érodées est redéposé et accumulé en aval de la parcelle (van Oost et al., 2007).

Le stock de carbone est défini pour une épaisseur de sol donnée. Le stock de carbone est la quantité totale de C contenue dans la couche de sol, par unité de surface, généralement exprimée en $t \cdot ha^{-1}$. On le calcule généralement en multipliant la concentration massique en C par la masse de terre fine contenue dans la couche de sol considérée. Cette dernière est le produit de l'épaisseur de la couche, de la proportion massique de terre fine et de la densité apparente du sol.

1.2.2 — Références disponibles sur le stockage de C dans les sols au voisinage des haies

Peu de travaux ont quantifié le stockage de C dans le sol en relation avec les haies en milieu tempéré et l'essentiel se sont concentrés sur les 30 premiers centimètres de sol. Les estimations réalisées montrent une forte variabilité entre les situations étudiées. Les travaux menés sur les haies en Europe montrent un stockage additionnel de C, dans l'horizon 0-30 cm, de -0,2 à 0,38 tC pour 100 m linéaires de haies au voisinage des haies par rapport à une situation agricole sans haie (Tableau 2.1).

En France, INRAE a quantifié sur le stockage de C organique des sols au voisinage de haies en Bretagne dans les années 2000, dans le cadre de travaux détaillés sur l'impact des haies sur l'organisation des sols dans les paysages agricoles (Walter et al. 2003 ; Follain, 2007 ; Lacoste, 2012). L'essentiel de ces travaux a été mené sur des haies anciennes appartenant au bocage relictuel, et implantées il y a plus de 50 ans. La plupart des mesures ont été réalisées sur des haies parallèles aux courbes de niveau, dans des situations de sols limoneux fortement sensibles à l'érosion : les stocks mesurés incluent donc potentiellement l'effet d'accroissement local du stockage de C et l'effet anti-érosif. La structure de la haie et les pratiques de gestions n'ont pas été relevées. Walter et al. (2003) ont mesuré des stocks de C sur 7 haies situées dans le nord de l'Ille et Vilaine. In fine, ils considèrent que si la contribution du processus anti-érosif est déduite, la présence de haies a conduit à un stockage de 1 à 30 $tC \cdot ha^{-1}$ de haie sur l'horizon 0-30 cm. Reprenant ces travaux, Arrouays et al. (2012) retiennent une valeur de stockage additionnel de C dans le sol en présence de haies, dans l'horizon 0-30 cm dans une bande de 10 m (5 m de part et d'autre de la haie), de soit 5 tC pour 100 m linéaires de haies, avec une erreur de plus ou moins 2 tC pour 100 m. Viaud et Kunnemann (2021) un impact des haies sur le stockage de C jusqu'à 3 m de la haie en profondeur et jusqu'à 1 m en surface, dans 3 sites situés dans l'Ouest de la France. Ils montrent aussi une forte variabilité du stockage additionnel de C sur l'échantillonnage réalisé, allant de 0,5 à 2,6 tC pour 100 m linéaires de haies dans l'horizon 0-30 cm, et de 0,6 à 4,7 dans l'horizon 0-90 cm.

Tableau 2.1 : Références bibliographiques sur le stockage additionnel de C dans le sol au voisinage des haies en Europe, par rapport à un stock de référence sans haie.

Référence	Localisation	Usage des sols	Horizon de sol (cm)	Stock de C de référence (tC. ha ⁻¹)	Stock de C additionnel (tC pour 100 m linéaires)
(Biffi et al., 2022)	Angleterre	Prairies gérées	0-30	97	<u>0,11</u>
(Ford et al., 2019)	Pays de Galle	Prairie permanente	0-15	62	<u>0,06</u>
(Paulsen et Bauer, 2008)	Allemagne	Prairie	0-30	125	<u>-0,19</u>
		Culture	0-30	68	<u>0,38</u>
(Van Vooren et al., 2018)	Belgique	Prairie gérée	0-30	39	<u>-0,02</u>
		Blé	0-30	36	<u>0,07</u>
(Van den Berge et al. 2021)	Belgique	Maïs	0-23	59,5	<u>0,22</u>

L'impact de l'usage des sols dans les parcelles adjacentes sur le stockage additionnel de C au voisinage des haies est peu discuté dans la littérature. Pellerin et al. (2019) font l'hypothèse d'un stockage additionnel nul au voisinage de haies en prairie, mais ils pointent le manque de références sur ce type de contextes. Au contraire, les travaux de Viaud et Kunnemann (2021) montrent un stockage additionnel également en prairie. L'impact des structures de haies et des modalités de gestion des haies n'est quasiment pas traité dans la littérature (Crossland, 2015).

1.2.3 — Méthodes utilisées pour quantifier les stocks additionnels de C dans les sols au voisinage des haies

La **quasi-totalité des données existantes proviennent d'études synchroniques** qui comparent, à une date donnée, le stock de C mesuré au voisinage d'une haie à un stock, mesuré ou estimé au même moment, dans une situation sans haie considérée comme de référence. Très peu d'études ont quantifié l'évolution du stock de C dans une parcelle depuis la plantation des arbres. La valeur de référence est soit une valeur issue de la littérature sur les stocks de C observés pour le type d'usage des sols de la parcelle (références nationale ou régionale), soit le stock de C mesuré sur le terrain dans la parcelle adjacente à la haie à distance de celle-ci. L'utilisation de valeur de la littérature introduit une incertitude forte sur les stocks de référence, compte tenu de la variabilité des stocks de C dans les sols observée pour un usage des sols donné, aux échelles régionales ou nationales. Le stock au voisinage de la haie est généralement mesuré soit immédiatement sous la haie, soit à une distance de 1m du pied des arbres. Le stock est majoritairement mesuré sur une profondeur de 30 cm maximum.

1.3 — Objectifs

L'objectif de ce travail est de produire de premiers éléments de références chiffrés de stocks de carbone dans le compartiment sol, dans 3 contextes pédo-climatiques différents : Normandie, Bourgogne-Franche Comté, et Hauts-de-France (Avesnois-Thiérache).

Pour cela, cette sous-action sur les sols a pour but de proposer un protocole d'estimation du potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols liés aux haies à partir de mesures sur le terrain qui puisse être appliqué pour une évaluation à grande échelle. En effet des études détaillées (Walter et al., 2003 ; projet CARBOCAGE), s'appuyant sur un échantillonnage lourd des sols, ont montré un stockage de carbone plus important aux voisinages de haies et un impact des haies sur les stocks de carbone du sol pouvant aller à plusieurs mètres de la haie et toucher les horizons de sols profonds. L'enjeu ici est de voir quelle simplification

du protocole est possible, tout en garantissant la robustesse et la significativité des résultats d'évaluation de ces stocks, pour viser une évaluation dans un plus grand nombre de situations. Cette action vise également à fournir une 1ère évaluation du stockage additionnel de carbone sur les sites étudiés.

PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS

2.1 – Méthodologie

Dans cette action, nous avons estimé l'impact des haies sur le stockage additionnel de C dans les sols dans les sites d'études, en mettant en œuvre **un protocole de mesures basé sur un échantillonnage des sols sur le terrain et inspiré des travaux de recherche détaillés** qui ont été menés sur les haies. Ce protocole a été raisonné sur la base des résultats de ces études (Viaud et Kunneman, 2021), il implique néanmoins un échantillonnage dense et des travaux de terrain et de traitements et d'analyse des sols au laboratoire conséquents (voir la quantification plus bas).

Dans une perspective d'opérationnalité et d'étude de la faisabilité du stockage additionnel de C dans les sols à plus grande échelle, nous avons ensuite **quantifié l'impact de simplifications de ce protocole** sur l'estimation du stockage additionnel de C dans le sol au voisinage des haies.

2.1.1 — Sites d'échantillonnage retenus

Pour cette action centrée sur le stockage de C dans les sols, le travail a été mené dans 3 des 4 régions ciblées pour l'étude : aucune mesure n'a été réalisée en Mayenne. Dans chacune de ces 3 régions, nous avons sélectionné un sous-ensemble de haies parmi celles retenues pour l'évaluation de la biomasse (Tableau 2.2). Dans la mesure du possible, le stockage de C dans les sols a été évalué de part et d'autre de la haie, soit un total de 45 parcelles étudiées, adjacentes à une haie.

Nous avons sélectionné les haies de sorte **d'éviter la présence d'arbres, de haies ou autres artefacts (ex : anciens chemins) dans le passé dans les parcelles adjacentes**. Les propriétés des sols et en particulier le stock de C dans les sols peuvent en effet être toujours marqués par la présence ces structures dans le passé. Nous nous sommes appuyés pour cela sur les photographies aériennes anciennes (à partir des années 1950) et récentes disponibles dans les régions étudiées. Nous avons aussi sélectionné des situations de faible pente : **notre étude n'intègre donc pas de situation avec de l'érosion hydrique significative** qui peut contribuer à la redistribution des stocks de C au sein des parcelles étudiées, et à une augmentation locale du stockage de C dans le sol au voisinage des haies par dépôt de particules érodées en amont et riche en C.

Dans cet échantillonnage, les types de haies sont diversifiés entre les 3 régions (Tableau 2.2), mais on ne retrouve pas un même type de haies dans plusieurs régions : chaque région est caractérisée par un ou plusieurs types qui lui sont spécifiques.

Les systèmes de cultures dans les parcelles échantillonnées sont relativement homogènes. Il s'agit en effet de 3 régions de polyculture-élevages ; les systèmes de culture pratiqués sur les parcelles sont donc associés à l'élevage, notamment à l'élevage bovin. Les parcelles sont utilisées soit en successions de cultures annuelles (maïs – céréales principalement) avec prairies temporaires, soit en prairies permanentes. Les parcelles reçoivent toutes des apports de C via la restitution des résidus de cultures, et via la fertilisation organique des sols (apports directs par les animaux dans les prairies temporaires ou permanentes pâturées, et par apports d'effluents d'élevage dans les cultures et prairies). L'échantillonnage n'est pas équilibré au regard des grandes catégories d'occupation du sol : les prairies permanentes sont dominantes.

Tableau 2.2 : Localisation des échantillonnages et situations échantillonnées pour l'estimation du stockage de C dans le sol.

Région	Nombre de haies étudiées	Type de haies principaux	Nombre de parcelles échantillonnées	Occupation du sol dans les parcelles	Nombre d'échantillons de sol
Normandie (Orne)	8	Cépées d'arbres et d'arbustes	16	6 prairies permanentes, 5 rotations prairies-cultures, 5 rotations de cultures annuelles	246
Bourgogne (Nièvre et Yonne)	7	Hauts-jets, cépées d'arbres et d'arbustes	14	8 prairies permanentes, 4 rotations prairies-cultures, 3 rotations de cultures annuelles	212
Hauts de France (Aisne et Nord)	8	Alignements de têtards, futaies irrégulières	15	11 prairies permanentes, 2 rotations prairies-cultures, 1 rotation de cultures annuelles	187

Cependant, cet échantillonnage nous a permis de **couvrir une certaine diversité de sols**, et notamment une large gamme de propriétés des sols susceptibles d'affecter le stockage de C et l'impact des haies sur le stockage additionnel vis-à-vis d'une situation sans haie. Si les types de sols échantillonnés sont assez similaires en termes de classification pédologique et de développement de profil de sol (brunisol, néo-luvisols, luvisols), **les sols présentent un gradient important de texture**, depuis des sols argileux, à des sols sablo-limoneux et des sols limoneux (Figure 2.2). Quelques sols de la région Bourgogne contiennent du calcaire.

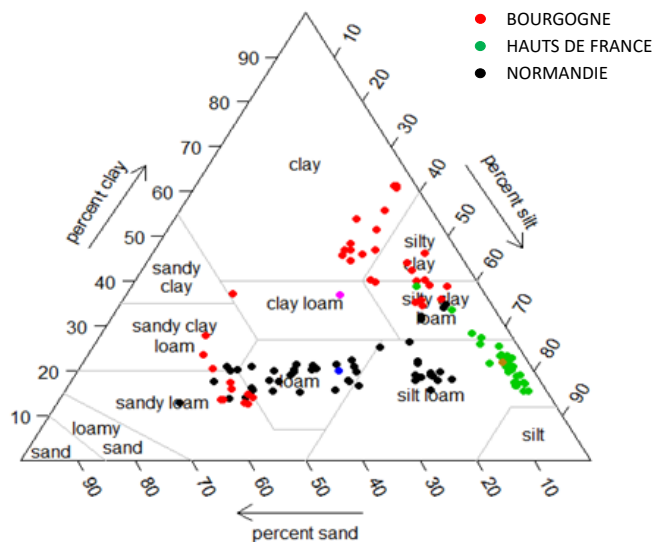


Figure 2.2. Positionnement des points d'échantillonnage pour l'estimation du stockage de C dans les sols sur le triangle des textures de l'USDA (United States Department of Agriculture / département d'agriculture des Etats-Unis).

Clay = argile, sandy clay = argile sableux, sandy clay loam = limon argilo-sableux, sandy loam = limon sableux, loamy sand = sable limoneux, sand=sable, clay loam = limon argileux, loam= limon, silty clay = argile limoneuse, silty clay loam = limon argileux fin, silt loam = limon fin, silt = limon très fin.

2.2 — Stratégie d'échantillonnage mise en œuvre sur chaque site

Le protocole d'échantillonnage a été conçu pour prendre en compte le fait que les haies peuvent avoir un impact sur les stocks de C dans le sol, non seulement immédiatement sous la haie, mais jusqu'à plusieurs mètres du pied de la haie dans les parcelles adjacentes à celle-ci. **Les sols ont été échantillonnés en**

dehors des périodes de fertilisation des parcelles : en effet, l'apport de fertilisant organique peut augmenter significativement le stock de C du sol à court terme et un stock de C mesuré proche d'une date d'épandage ne serait pas représentatif du stock de fonds dans la parcelle.

Dans chaque parcelle adjacente à une haie, des points d'échantillonnage des sols ont été localisés le long de 3 transects perpendiculaires à la haie (Figure 2.3). Ces 3 transects permettent d'intégrer l'hétérogénéité potentielle des sols et des stocks de C le long de la haie. Sur chaque transect, des points d'échantillonnage ont été positionnés à des distances de 1, 2, 3, et 10 m de la haie. **Les zones spécifiques de type passage de roues ou sol visiblement remanié ont été exclues de l'échantillonnage.**

Sur chaque point d'échantillonnage :

- **des échantillons de sol ont été prélevés à la tarière hélicoïdale manuelle à 4 profondeurs** : 0-15, 15-30, 30-60, 60-90 cm. Pour une distance et une profondeur donnée, les 3 échantillons collectés sur les 3 transects ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite sur lequel les analyses de sol sont réalisées.
- **des échantillons de sol non remaniés ont été prélevés à la tarière à mas racinaire munie d'un cylindre de 8 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur**, pour la mesure de la densité apparente du sol à 2 profondeurs : 0-15, 15-30 cm. Un échantillonnage jusqu'à 90 cm de profondeur a été réalisé sur quelques parcelles en Normandie et en Bourgogne.

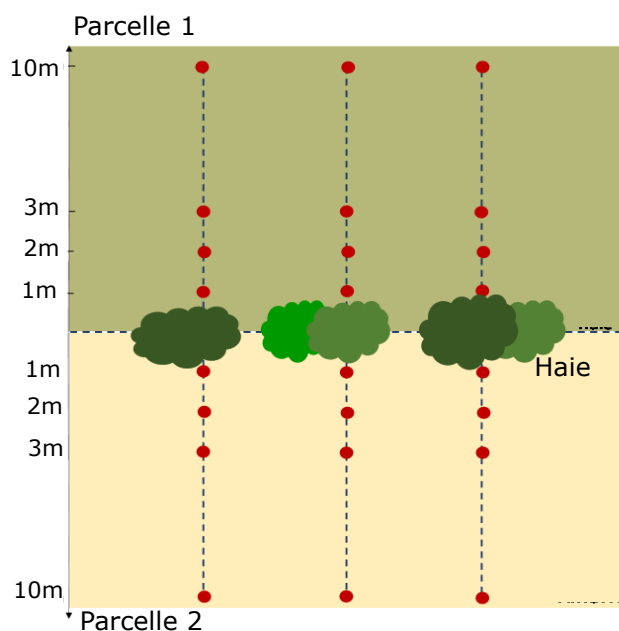


Figure 2.3. Stratégie d'échantillonnage des sols au voisinage d'une haie, dans les parcelles adjacentes à celle-ci.

Les points rouges figurent la localisation des points d'échantillonnage des sols. En chaque point, les sols ont été échantillonnés aux profondeurs 0-15, 15-30 cm, 30-60 et 60-90 cm à la tarière hélicoïdale, et aux profondeurs 0-15 et 15-30 cm à la tarière à mas racinaire.

2.3 — Analyses de sol

Les échantillons composites ont été conservés à 4°C au retour du terrain, puis séchés à l'air. Les **teneurs en calcaire, en carbone organique** (NF ISO 10694) (g.kg-1) et en azote total (NF ISO 13878) (g.kg-1), ainsi que la **granulométrie** (NF X31-107) ont été mesurées.

Les échantillons prélevés à la tarière à mas racinaire ont été pesés et séchés à 105°C pendant 48h pour déterminer l'humidité pondérale des sols et la **densité apparente** (g.cm⁻³). Pour estimer la densité apparente des sols dans les horizons 30-60 et 60-90 cm où des mesures n'ont été réalisées que sur quelques points, nous avons mobilisé des références disponibles sur la densité apparente des horizons de sol profonds (Jamagne, 1973), ainsi que quelques données mesurées, pour ajuster un modèle d'estimation de la densité apparente en nous appuyant sur Martin et al. (2009) et en utilisant un modèle GBM (Gradient Boosting Modeling).

Le stock de C (tC.ha⁻¹) à chaque profondeur et à chaque distance est obtenu par le produit de la teneur en C par la densité apparente :

$$SOC_{d,h} = C_{d,h} \cdot Da_{d,h} \cdot ep_h \cdot 10^{-1} \quad \text{Eq. 2.1}$$

où $SOC_{d,h}$ est le stock de C dans l'horizon h à la distance d de la haie (t.ha⁻¹), $C_{d,h}$ est la teneur en C dans l'horizon h à la distance d de la haie (g.kg⁻¹), ep_h est l'épaisseur de l'horizon h (cm).

2.4 — Calcul des stocks additionnels de C au voisinage des haies

En nous appuyant sur des travaux précédents (Viaud et Kunneman, 2021), nous avons fait l'hypothèse que les stocks mesurés à 10 m de la haie ne sont pas affectés par celle-ci et les avons considérés comme les stocks de référence de la parcelle.

La significativité des différences de stock à chaque distance par rapport au stock de référence a été testée par des analyses statistiques, avec des différences considérées comme significatives à $p < 0.05$. Pour chaque profondeur échantillonnée, nous avons analysé l'influence de la distance à la haie sur les stocks de C. L'échantillonnage présente une structure spécifique : les échantillons sont appariés par les parcelles, les parcelles par les haies et les haies par les sites d'échantillonnage. Pour prendre en compte cette structure nous avons ajusté des modèles linaires mixtes pour tester l'effet de la distance sur le stockage de C dans le sol. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la normalité de la distribution des données. Les données ont été transformées en log lorsque nécessaire. Lorsque les hypothèses étaient vérifiées, une ANOVA a été réalisée sur le modèle et un test de Tukey HSD a été utilisé pour les comparaisons de moyennes. Quand les hypothèses de l'ANOVA n'étaient pas vérifiées, nous avons réalisé un test non-paramétrique

Pour les distances et profondeurs pour lesquelles le stock de C diffère significativement de celui mesuré à 10 m, nous avons calculé le stock additionnel de C (tC.ha⁻¹) lié à la présence de haie. Celui-ci a été calculé comme la différence entre le stock à la distance donnée et le stock de référence.

$$\Delta SOC_{d,h} = SOC_{d,h} - SOC_{10,h} \quad \text{Eq. 2.2}$$

où $\Delta SOC_{d,h}$ est le stock de C additionnel lié à la présence de la haie dans l'horizon h à la distance d de la haie (t.ha⁻¹), $SOC_{d,h}$ est le stock de C dans l'horizon h à la distance d de la haie (t.ha⁻¹), et $SOC_{10,h}$ est le stock de C dans l'horizon h à la distance 10 m de la haie, considéré comme référence (t.ha⁻¹).

Le stock additionnel total de C dans la parcelle, exprimé en tC pour 100 m linéaires de haie, a été calculé par intégration des stocks de C mesurés sur la zone d'influence de la haie, en considérant un stock réparti de façon homogène entre 0 et 1 m de la haie et également au stock mesuré à la distance de 1m et une décroissance du stock avec la distance au-delà de 1m.

2.5 — Simplifications de la méthode de mesure envisagées

L'estimation des stocks additionnels de C en s'appuyant sur l'échantillonnage terrain proposé ci-dessus représente un temps de travail conséquent. Nous avons donc testé 3 modalités de simplification du protocole et évalué l'écart sur la prédiction du stock additionnel :

1. une **limitation de l'échantillonnage à 2 distances de la haie** : 1 m et 10 m (point de référence)
2. une **limitation de l'échantillonnage à l'horizon de surface** (0-30 cm)
3. une limitation de l'échantillonnage aux prélèvements à la tarière hélicoïdale et une **estimation de la densité apparente par des modèles**. Quatre modèles différents ont été testés : 3 correspondent à des fonctions de pédotransfert issue de la littérature (Tableau 2.3) ; le 4^{ème} correspond une modélisation statistique de la densité apparente par un modèle GBM (Martin et al., 2009) ajusté à partir des données disponibles sur les sites d'étude. L'ensemble des modèles mobilisent des informations sur la teneur en matière organique des sols, et certains sur la granulométrie en chaque point d'échantillonnage. La modélisation GBM suppose d'avoir des informations sur les valeurs de densité apparente dans la zone étudiée pour calibrer le modèle.

Tableau 2.3 : Fonctions de pédotransfert utilisées pour estimer la densité apparente (DA, g.cm⁻³) des sols dans une perspective de simplification de l'échantillonnage.

	Référence	Forme de la fonction	Description des variables
Méthode 1	Cousin et al. (2018)	$DA = 1,437 + 7,9 \cdot 10^{-3} \cdot \text{clay} + 3,881 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sand} - 4,494 \cdot 10^{-4} \cdot \text{clay}^2 + 1,991 \cdot 10^{-5} \cdot \text{sand}^2 - 8,799 \cdot 10^{-4} \cdot \text{silt} \cdot \text{MO} - 1,211 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sand} \cdot \text{MO}$	clay teneur en argiles (%), silt teneur en limons (%), sand teneur en sables (%), MO teneur en matière organique (%)
Méthode 2	Manrique et Jones (1991)	$DA = 1,660 - 0,308 \cdot \sqrt{C}$	C teneur en carbone organique (%)
Méthode 3	Alexander (1980)	$DA = 1,660 - 0,318 \cdot \sqrt{C}$	C teneur en carbone organique (%)

2.6 – Déroulé du projet

2.6.1 – Organisation mise en place

Les moyens humains et financiers mobilisés pour réaliser cette sous-action sont décrits dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Estimations des coûts en temps et des coûts financiers associés à l'estimation des stocks additionnels de C dans le sol au voisinage des haies dans les 3 sites étudiés, par haie.

Caractéristiques de l'échantillonnage	Points d'échantillonnage	24
	Profondeurs prospectées à la tarière hélicoïdale	4
	Profondeurs prospectées à la tarière à mas racinaire	2
	Nombre d'échantillons de sols composite	96
	Nombre d'échantillons de sols non-remaniés	48
Temps de travail pour le prélèvement et traitement des échantillons (personne.jour)	Temps total prélèvement terrain	1,3
	Temps de préparation des échantillons composites pour analyse ^a	4,6
	Temps de traitement des échantillons non remaniés ^b	5,1
	Temps total de prélèvement et traitement	9,7
Coût des analyses chimiques des sols (€)	Prise en charge et broyage des sols	1239
	Teneurs en CaCO ₃ , C et N total	1250
	Granulométrie 5 fractions	1632
	Coût total des analyses chimiques	4121

2.6.2 – Étapes

Cette partie a débuté en Octobre 2020. Initialement, les prises de mesures devaient s'étaler sur une seule saison hivernale.

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08
Echantillonnage		Choix des sites d'étude et recherche des haies échantillonnées (avec gestion et chantier)										
Carbone Sols			Prélèvement des échantillons sur les sites et conditionnement, préparation des échantillons				Traitement des échantillons et réalisation des analyses de sol					Analyse des données Et rédaction du rapport

Finalement, à la suite d'un avenant avec l'ADEME co-financeur du projet, la prise de données a pu être élargie à 2 saisons hivernales.

Année	2020			2021												2022										
Mois	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10/11	
Echantillonnage	Choix des sites d'étude et recherche des haies échantillonnées (avec gestion et chantier)																									Rédaction rapport et restitution des résultats
Carbone Sols				Prélèvement des échantillons sur les sites et conditionnement, préparation des échantillons						Traitement des échantillons et réalisation des analyses de sol						compléments de prélèvements sur sites		Analyse des données				Rédaction rapport et restitution des résultats				

PARTIE 3 – RESULTATS

3.1 — Stocks de référence dans les sites échantillonnés

Les stocks mesurés à 10 m dans les parcelles échantillonnées et qui servent de référence au calcul des stocks additionnels au voisinage des haies présentent une variabilité à l'échelle de l'échantillonnage (Figure 2.4). Contrairement à ce qui est établi dans la littérature, les stocks tendent à être plus élevés dans les parcelles utilisées en rotations de cultures annuelles que dans les prairies permanentes, y compris dans les horizons de surface 0-15 et 15-30 cm. Mais dans l'échantillonnage, les parcelles en successions de cultures annuelles se situent principalement en Normandie, où les sols présentent de façon générale, en moyenne, des stocks plus élevés que dans les 2 autres régions. Les stocks de références tendent à être plus élevés dans les sols de texture argileuse ou limoneuse.

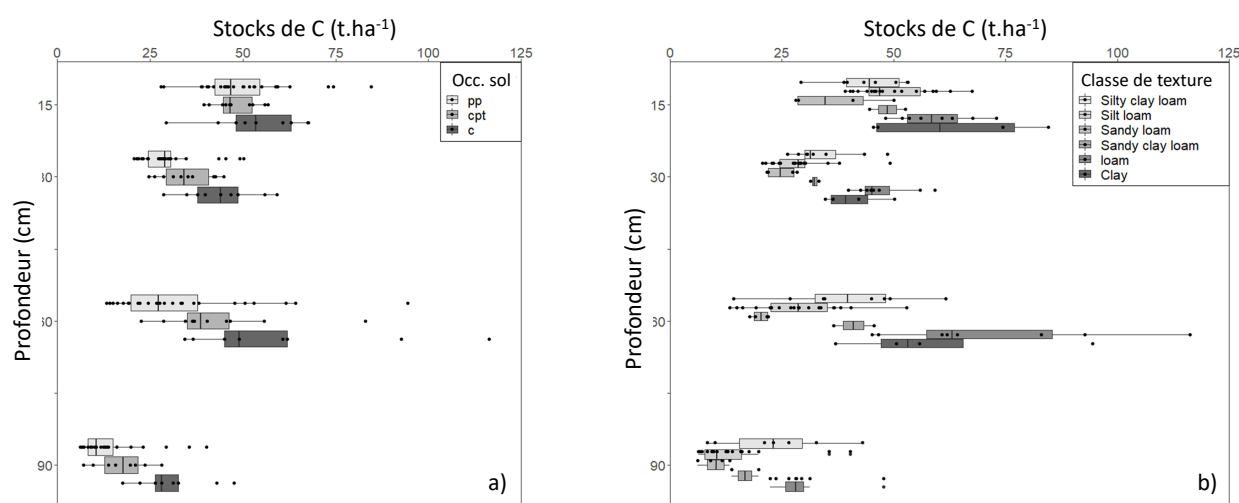


Figure 2.4. a) Box-plots des stocks de C de référence, mesurés à 10 m des haies, à 4 profondeurs de sol (0-15, 15-30, 30-60 et 60-90 cm) pour les différents usages des sols : pp = prairies permanentes, cpt= rotations de culture et prairies temporaires, c= rotations de cultures annuelles. b) Box-plots des stocks de C de référence, mesurés à 10 m des haies, à 4 profondeurs de sol (0-15, 15-30, 30-60 et 60-90 cm) pour différentes les différentes classes de texture du sol.

Clay = argile, sandy clay loam = limon argilo-sableux, sandy loam = limon sableux, loam= limon, silty clay loam = limon argileux fin, silt loam = limon fin. Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75%, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile. Les points représentent les données individuelles.

Les stocks de C totaux de référence, sur 90 cm de sol, sont en moyenne de 184, 144 et 138 tC/ha (Figure 2.5), respectivement en Normandie, Bourgogne et dans les Hauts de France. Sur les 30 premiers centimètres de sol, ces stocks sont en moyenne de 81, 75 et 76 tC/ha, respectivement en Normandie, Bourgogne et dans les Hauts-de-France : par rapport aux références nationales (GIS Sol, 2011), ils correspondent à des stocks élevés, supérieurs à 50 à 70 tC/ha, rencontrés dans les régions forestières ou fourragères de France.

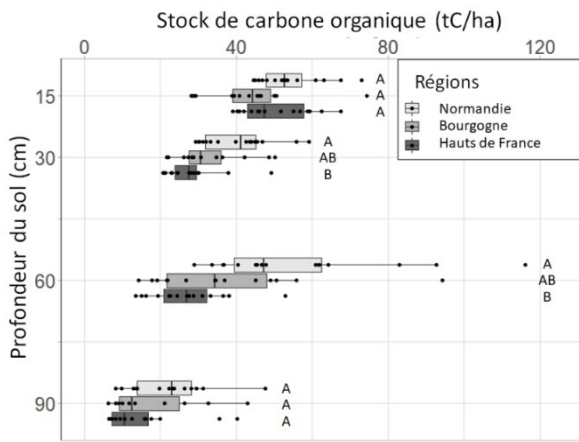


Figure 2.5. Box-plots des stocks de C de référence, mesurés à 10 m des haies, à 4 profondeurs de sol (0-15, 15-30, 30-60 et 60-90 cm) pour les différents dans les 3 régions échantillonnées.

Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75%, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile. Les points représentent les données individuelles.

3.2 — Validation d'un effet des haies sur le stockage de C dans les sols

L'analyse de variance permettant de comparer le stock de C à différentes distances de la haie, montre que les stocks de C à proximité des haies sont bien significativement différents des stocks à distance et des stocks considérés comme stock de référence dans une situation sans haie (Figure 2.6).

Pour les horizons 0-30 et 30-60 cm, les stocks de C à proximité de la haie sont significativement différents des stocks de référence à 10 m jusqu'à une distance de 2 m du pied de la haie. Au-delà (60-90 cm), les stocks à proximité de la haie sont significativement différents des stocks de référence uniquement à 1m de la haie. Nous observons cet effet haie quel que soit l'usage du sol adjacent à la haie (rotation de cultures annuelles, rotation de prairies temporaires et cultures annuelles, ou prairies permanentes). Nous pouvons donc calculer un stock additionnel de C au voisinage de la haie jusqu'à une distance de 2 m dans la couche 0-60 cm de sol et jusqu'à une distance de 1 m dans l'horizon 60-90 cm.

Le stockage additionnel total présente une forte variabilité sur l'échantillonnage (Figure 2.7) : il est en moyenne de 0,58 tC pour 100 m linéaires de haies, avec un intervalle de confiance à 95% de [0,44 – 0,74] tC pour 100 m linéaires de haie. Pour un quart des parcelles échantillonnées, le stock additionnel de C est supérieur à 0,8 tC pour 100 m de haies. Les stocks additionnels totaux de C sont en moyenne de 0,69, 0,53 et 0,51 tC pour 100 m linéaires de haie, respectivement en Normandie, Bourgogne et dans les Hauts-de-France (Figure 4). Ces stocks additionnels représentent une augmentation relative du stock de C de 0,43, 0,44 et 0,45 % dans une parcelle de 1 ha qui serait bordée de 100 m de haie, respectivement en Normandie, Bourgogne, et dans les Hauts de France. Ils représentent une augmentation relative du stock de C de 14 % en Normandie et 15 % en Bourgogne et dans les Hauts-de-France, localement dans la zone d'influence de la haie (bande de 2m de large à partir du pied de la haie).

Il n'existe pas de relation entre la valeur du stock de référence dans la parcelle et le stock additionnel de C au voisinage de la haie (Figure 2.8).

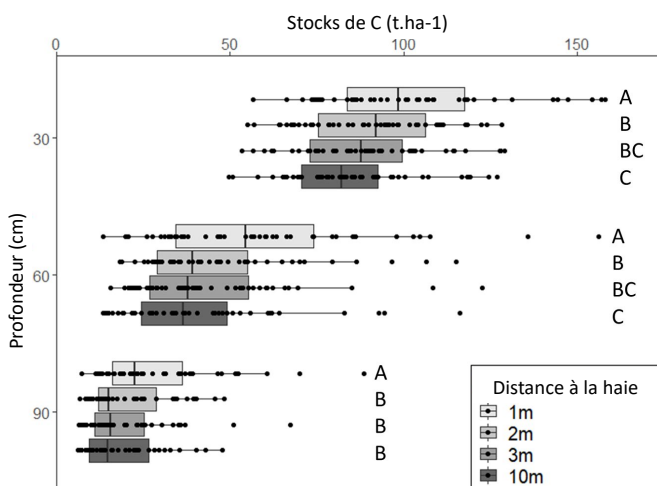


Figure 2.6. Box-plots des stocks de C à différentes distances de la haie et pour 3 profondeurs de sol (0-30, 30-60 et 60-90 cm). Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75%, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile. Les points représentent les données individuelles. Les lettres caractérisent la significativité des différences de stocks entre les distances, par horizon ($p < 0,05$).

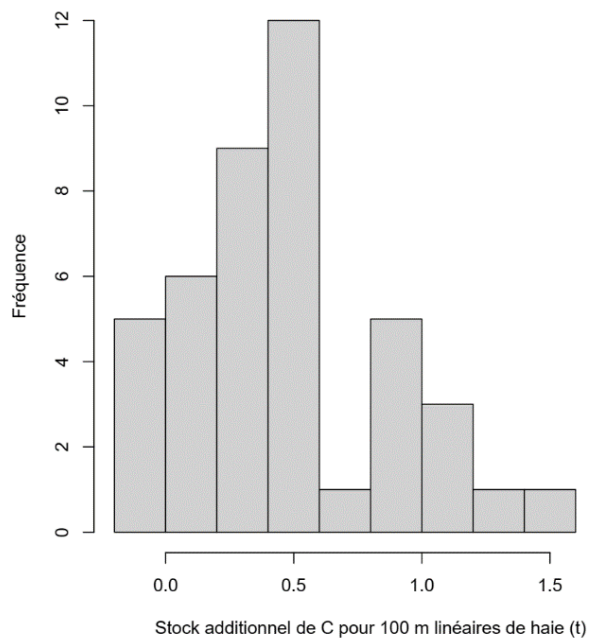


Figure 2.7. Histogramme de distribution des valeurs de stocks additionnel de C estimée pour 100 m linéaires de haie dans les 45 parcelles échantillonnées.

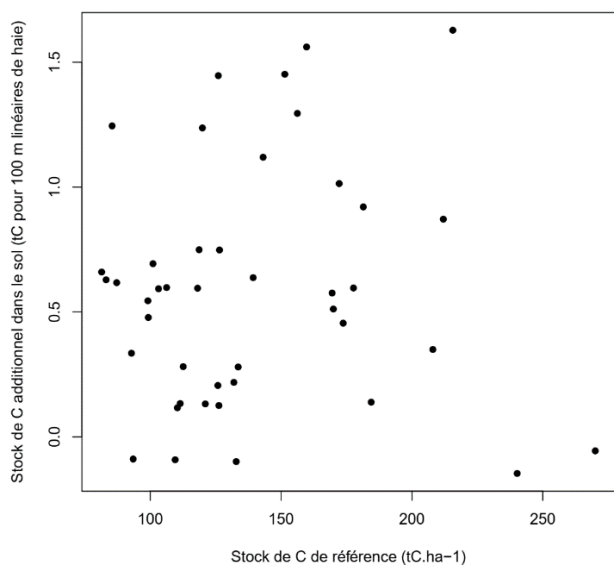


Figure 2.8. Stock de C additionnels totaux exprimés en fonction des stocks C de référence, mesurés à 10 m dans les parcelles.

3.3 — Impact d'un allègement de la méthode de mesure sur l'estimation du stockage additionnel de C dans les sols au voisinage des haies

3.3.1 — Limitation de l'échantillonnage à 1 et 10m de la haie

Réduire l'échantillonnage au 1er mètre du pied de la haie conduit en moyenne à sous-estimer le stock de C additionnel pour 100 m linéaires de 0.12 tC, soit une sous-estimation moyenne de 20%. Mais compte-tenu de la variabilité des mesures, cet effet n'est pas significatif à l'échelle de l'échantillonnage (Figure 2.9) : les stocks additionnels estimés en ne considérant que le 1^{er} mètre ne sont pas significativement différents des stocks mesurés en intégrant les 2 premiers mètres.

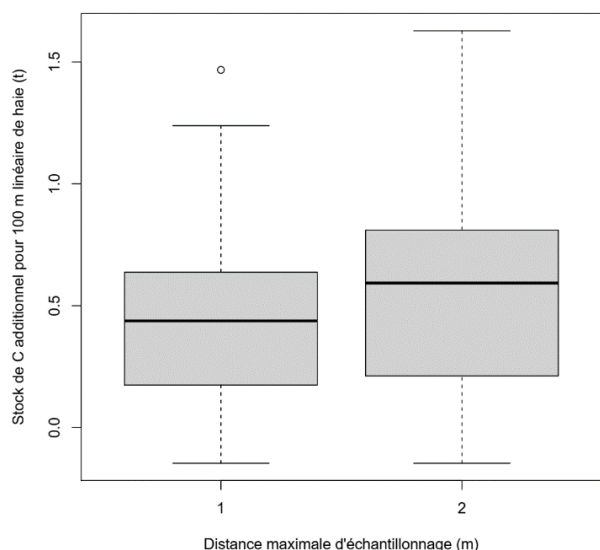


Figure 2.9. Box-plot des valeurs de stocks additionnel de C estimée pour 100 m linéaires de haie dans les 45 parcelles échantillonnées, pour des distances maximales d'échantillonnage par rapport à la haie de 1 et 2 m. Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75%, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile.

Le stock additionnel dans le 1er mètre du pied de la haie représente 60 à 100% du stock additionnel estimé sur l'ensemble des 2 premiers mètres. Il existe **une relation linéaire forte entre le stock additionnel dans le 1er mètre et le stock additionnel estimé sur les 2 premiers mètres** (Figure 2.10).

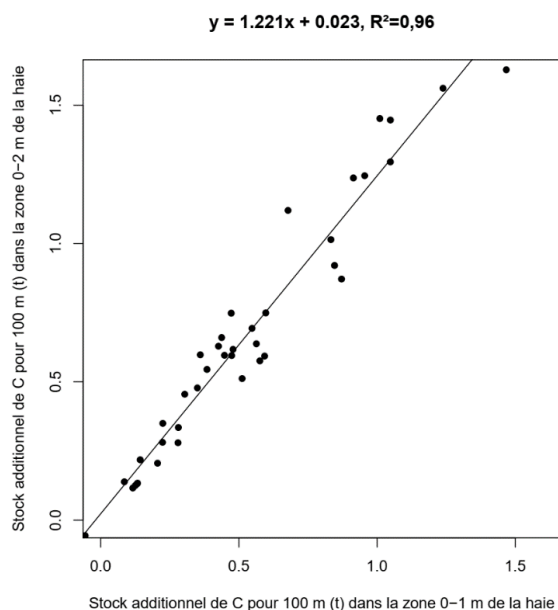


Figure 2.10. Stocks additionnel de C dans les sols estimés pour 100 m linéaires de haie dans la zone 0 à 2 m du pied de la haie, en fonction des stocks additionnels de C estimés pour 100m linéaires de haie dans la zone 0 à 1m du pied de la haie.

La droite représente la régression linéaire entre les 2 valeurs, dont l'équation et le R^2 sont inscrits sur le graphique.

3.3.2 — Limitation de l'échantillonnage aux 30 premiers centimètres de sol

Réduire l'échantillonnage aux 30 premiers centimètres de sol conduit en moyenne à sous-estimer de façon significative ($p=0.001$) le stock de C additionnel pour 100 m linéaires de 0.30 tC par rapport à un échantillonnage sur 90 cm (Figure 2.11).

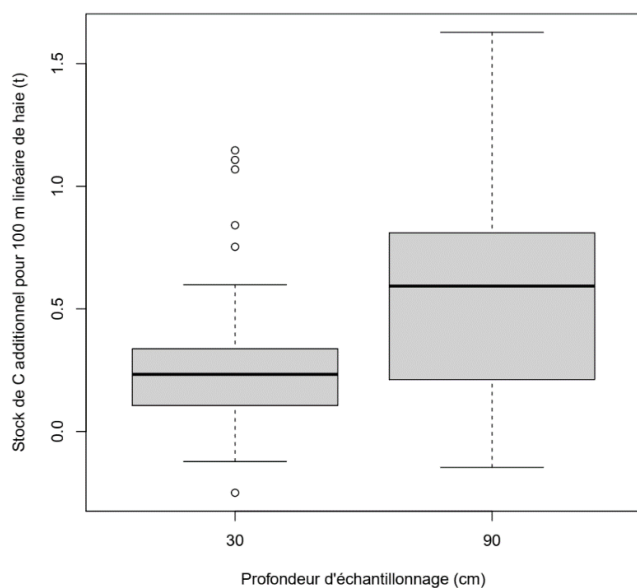


Figure 2.11. Box-plot des valeurs de stocks additionnel de C estimé pour 100 m linéaires de haie dans les 45 parcelles échantillonnées, pour des profondeurs d'échantillonnage du sol de 30 et 90 cm. Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75%, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile.

Il n'existe pas de relation simple entre le stock additionnel de C mesuré sur 30 cm et le stock additionnel de C mesurée jusqu'à 90 cm de profondeur, qui permettrait d'estimer le stock additionnel total à partir d'un échantillonnage des 30 premiers centimètres uniquement (Figure 2.12).

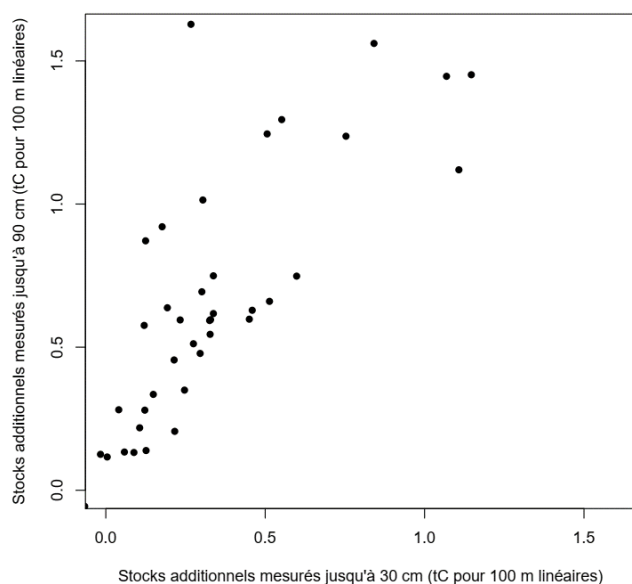


Figure 2.12. Stocks additionnel de C dans les sols estimés pour 100 m linéaires de haie jusqu'à 90 cm de profondeur, en fonction des stocks additionnels de C estimés pour 100m linéaires de haie jusqu'à 30 cm de profondeur.

3.3.3 — Estimation de la densité apparente au moyen de fonctions de pédotransfert

Les fonctions de pédotransfert utilisées conduisent à une incertitude sur l'estimation de la densité apparente en chaque point d'échantillonnage, par rapport à la méthode couplant la mesure de terrain en surface et l'estimation par modélisation en profondeur (Figure 2.13).

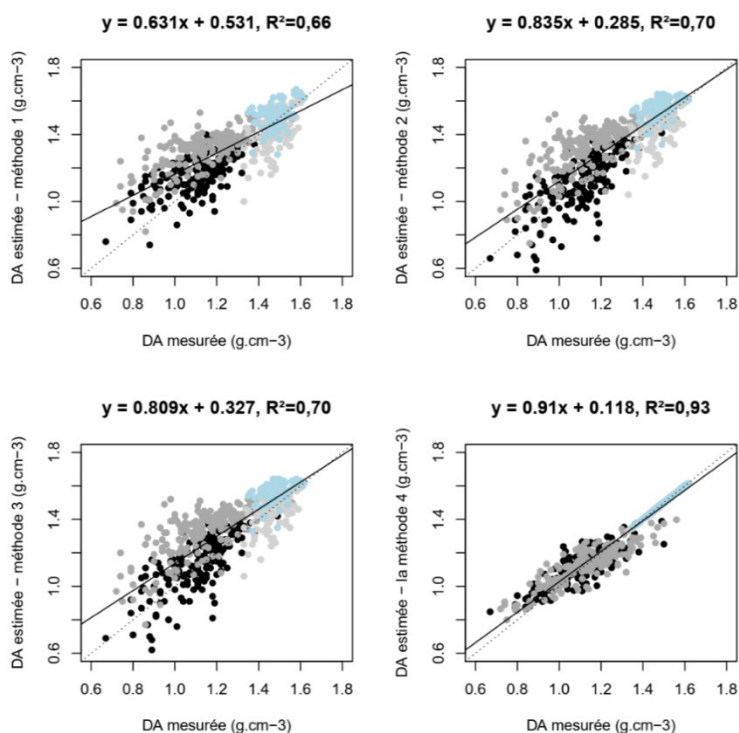


Figure 2.13. Densités apparentes (DA) du sol estimées par des fonctions de pédotransfert

(Méthode 1 = fonction proposée par Cousin et al. (2020), Méthode 2 = fonction proposée par Manrique et Jones (1991), Méthode 3 = fonction proposée par Alexander (1980), Méthode 4 = méthode proposée par Martin et al. (2009)), exprimées en fonction des densités apparentes estimées par la méthode couplant la mesure jusqu'à 30 cm et la modélisation par la modélisation GBM au-delà. Les couleurs représentent différentes profondeurs de sol prospectées : figurés noirs 0-30 cm, figurés gris foncé 15-30cm, figurés gris clairs 30-60 cm, et figurés bleus 60-90 cm.

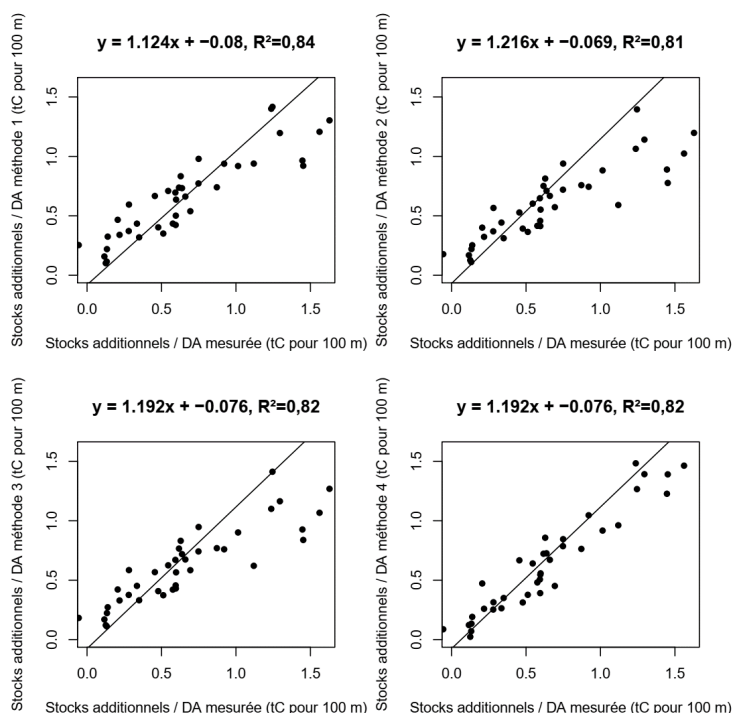


Figure 2.14. Stocks additionnels totaux de C dans le sol estimés à partir de méthodes d'estimation de la densité apparente(DA) du sol

(Méthode 1 = fonction proposée par Cousin et al. (2020), Méthode 2 = fonction proposée par Manrique et Jones (1991), Méthode 3 = fonction proposée par Alexander (1980), Méthode 4 = méthode proposée par Martin et al. (2009)), exprimées en fonction des densités apparentes estimées par la méthode couplant la mesure jusqu'à 30 cm et la modélisation par la modélisation GBM au-delà. Les couleurs représentent différentes profondeurs de sol prospectées : figurés noirs 0-30 cm, figurés gris foncé 15-30cm, figurés gris clairs 30-60 cm, et figurés bleus 60-90 cm.

Malgré cette incertitude induite par l'utilisation de fonctions de pédotransfert pour estimer la densité apparente en chaque point de mesure, l'utilisation de ces fonctions induit peu d'incertitude sur l'estimation moyenne des stocks additionnels de C au voisinage des haies à l'échelle de l'échantillonnage (Figure 2.14). Les 3 premières méthodes utilisées, qui s'appuient sur des fonctions de la littérature, introduisent

toutefois un biais dans l'estimation du stockage additionnel : elles tendent à sous-estimer les fortes valeurs de stocks additionnels et à légèrement sous-estimer les faibles valeurs. L'utilisation de la méthode 4 (méthode de Martin et al. 2009) est moins biaisée mais elle nécessite la disponibilité de références locales.

3.3.4 — Impact des simplifications du protocole sur les coûts

Les implications en termes de coûts en temps et de coûts financiers des différentes simplifications de protocole testées sont décrites dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Estimations des coûts en temps et des coûts financiers des différents protocoles d'échantillonnage envisagés pour l'estimation des stocks additionnels de C dans le sol au voisinage des haies.

		<u>Protocole complet</u>	<u>Limitation à 1 et 10 m</u>	Limitation à 30 cm	Pas de mesure de la densité apparente
Caractéristiques de l'échantillonnage	Points d'échantillonnage	24	12	24	24
	Profondeurs prospectées à la tarière hélicoïdale	4	4	2	4
	Profondeurs prospectées à la tarière à mas racinaire	2	2	2	0
	Nombre d'échantillons de sols composite	96	48	48	96
	Nombre d'échantillons de sols non-remaniés	48	24	48	0
Temps de travail pour le prélèvement et traitement des échantillons (personne.jour)	Temps total prélèvement terrain	1,3	0,7	0,6	0,75
	Temps de préparation des échantillons composites pour analyse ^a	4,6	2,3	2,3	4,6
	Temps de traitement des échantillons non remaniés ^b	5,1	2,5	5,1	0
	Temps total de prélèvement et traitement	9,7	4,8	7,4	4,6
Coût des analyses chimiques des sols (€)	Prise en charge et broyage des sols	1239	619	619	1239
	Teneurs en CaCO ₃ , C et N total	1250	624	624	1250
	Granulométrie 5 fractions	1632	816	816	1632
	Coût total des analyses chimiques	4121	2059	2059	4121

^a Temps de préparation d'un échantillon composite pour analyse (mise au séchage à l'air, tamisage à 2 mm, conditionnement) : 20 min.

^b Temps traitement d'un échantillon non remanié pour la mesure de la densité apparente (pesée, mise au séchage, tamisage, pesée de la terre fine et des élément grossier, mesure de l'humidité pondérale) : 45 min.

^c Coûts calculés sur la base d'une externalisation des analyses de sols au Laboratoire INRAE d'analyse des sols.

3.4 – Discussion des résultats

L'étude a permis d'approcher le stockage de C au voisinage de **haies inscrites dans des zones de polyculture-élevage**, qui sont à l'échelle nationale les systèmes agricoles auxquels les haies sont historiquement les plus associées. **Nous avons pu intégrer la diversité des grands types d'usages**

des sols présents dans ces systèmes, à savoir des successions de cultures annuelles, des successions de cultures annuelles et de prairies temporaires, et des prairies permanentes ou de longue durée pour lesquelles il y a peu de données dans la littérature. Les successions de culture annuelles sont les moins représentées dans l'échantillonnage. L'étude couvre d'autre part **un gradient important de granulométrie de sol**, et inclut en particulier des sols à forte teneur en argiles (>40%). Il faut noter que l'échantillonnage s'est limité aux sols bien drainés : les situations de zones humides, où des haies sont souvent présentes mais où la dynamique du C dans les sols présente des spécificités, ont été exclues de cette échantillonnage.

L'étude confirme un stockage additionnel de C dans les sols en présence de haies par rapport à une situation sans haie. Le stockage additionnel moyen mesuré sur l'échantillonnage est du même ordre de grandeur que celui rapporté dans la littérature à l'échelle européenne. Par rapport aux références françaises, les stocks additionnels sont inférieurs d'un ordre de grandeur à ceux rapportés par Walter et al. (2003). Mais ici les situations échantillonnées diffèrent par rapport à celles étudiées par Walter et al. (2003) en Bretagne. En effet, les situations retenues pour l'étude présentent un relief peu prononcé et sont peu sensibles et peu soumises à l'érosion hydrique ; en particulier les haies situées perpendiculairement à la pente ou interceptant les flux hydriques dans des versants présentant des pentes significatives, ont été exclues de l'échantillonnage, pour s'affranchir des effets d'accumulation de sol en amont de haie par dépôt de particules érodées en amont. La moyenne de stockage additionnel mesurée correspond aux valeurs basses rapportées par Viaud et Kunnemann (2021) – projet ADEME Carbocage – pour des haies de moins de 20 ans situées dans le nord-ouest de la France (Bretagne, Pays de Loire). Elle est 2 fois moins élevée que les valeurs rapportées les haies anciennes (1,4 à 4,7 tC pour 100 m linéaires de haie). Comme Viaud et Kunnemann (2021), l'étude montre un stockage additionnel y compris en prairie. Egalement de façon similaire à la littérature, on trouve **une grande variabilité de stockage additionnel dans les sols** en leur voisinage parmi les haies échantillonnées dans l'étude : il ne s'agit pas d'une variabilité entre les 3 sites régionaux échantillonnés (Normandie, Bourgogne, Hauts-de-France), mais bien d'une variabilité locale observée au sein même d'une région.

Sur le plan méthodologique, la démarche s'appuie sur la **comparaison de stocks mesurés au voisinage de haie à un stock de référence mesuré localement**. Disposer d'une référence locale, plutôt que d'une valeur de référence tirée de la littérature apparaît important pour pouvoir évaluer de façon fiable le stockage additionnel lié par les haies, compte tenue de la grande variabilité des stocks de référence observée sur l'échantillonnage, pour un même type de sol ou pour un même usage des sols. La stratégie d'échantillonnage mise en œuvre permet aussi de capter la distribution spatiale des stocks de C dans les premiers mètres au voisinage de la haie et de mettre en évidence la variabilité de cette organisation spatiale d'une situation à une autre.

Les résultats montrent, que sur les situations échantillonnées où l'érosion n'est pas un processus majoritaire d'apport / départ de C au voisinage des haies, **une simplification du protocole peut s'envisager en limitant à deux distances de la haie** : un point à proximité de la haie (1 m) et un point à distance servant de référence, sur 90 cm. Une **réduction de l'échantillonnage aux horizons de surface du sol** n'est pas souhaitable dans la perspective d'approcher le stockage additionnel total de C associé à la présence de haies. Ici la limitation à 90 cm est liée à la taille de la tarière à mas racinaire qui ne permet pas de prospecter plus en profondeur. Le prélèvement et le traitement des échantillons de densité apparente est une étape limitante pour la mise en œuvre de ce protocole. Sur le terrain, le prélèvement d'échantillons avec la tarière à mas racinaire peut être exigeant physiquement dans certains sols (compacts, argileux, caillouteux) et il nécessite des précautions, pour prélever un volume de sol effectivement non perturbé, sans tassement. Au laboratoire, le traitement des échantillons demande du temps et n'est pas externalisable dans des laboratoires d'analyse des sols. Nous montrons que si la mobilisation de fonctions de pédotransfert pour s'affranchir ou pour limiter le nombre de mesures terrains permet une bonne estimation de la moyenne des stocks additionnels à l'échelle des sites échantillonnés,

elle introduit un biais dans l'estimation des stocks dans chaque parcelle. De plus, l'utilisation de fonction de pédotransfert nécessite de disposer néanmoins de quelques références locales sur la densité apparente des sols pour vérifier la validité des fonctions choisies dans le contexte étudié.

3.5 – Liste et descriptif des livrables

Sur la globalité des résultats :

- Le rapport restituant l'ensemble du travail
- Un webinaire de présentation des méthodes et des résultats de l'action 2.4 intitulé « Évaluation des stocks et flux de biomasse et carbone des haies - Méthodologie et premières références dans quatre régions de France » qui s'est déroulé le 19 janvier 2023. Ce webinaire a rassemblé plus de 250 inscrits, et son enregistrement est disponible sur le site de l'Afac-Agroforesteries (<https://afac-agroforesteries.fr/webinaire-3/>);

Pour le transfert aux acteurs utilisant le modèle :

- Fiches résumés - <https://afac-agroforesteries.fr/webinaire-3/>
- Fiche présentation de l'ensemble de l'étude
- Fiche de présentation méthodologie carbone simplifiée
- Fiche des données référentiels

Les supports chiffrés :

- La base de données des haies mesurées

PARTIE 4 – PERSPECTIVES

4.1 – Suites envisagées

Pour consolider la méthodologie et la proposition de simplification du protocole par la réduction de l'échantillonnage à 2 distances de la haie, la perspective est **d'analyser les facteurs – propriétés des sols, usages des sols dans la parcelle adjacente, caractéristiques de la haie, qui peuvent expliquer la (forte) variabilité du stockage additionnel** de C au voisinage des haies observées entre les sites échantillonnés. Une meilleure compréhension de ces facteurs pourra permettre de proposer des adaptations de protocoles ou des guides pour l'échantillonnage en fonction des situations locales. Nous faisons en particulier l'hypothèse d'une dépendance du stock additionnel mesuré et de l'étendue de la zone d'influence de la haie à l'occupation du sol et aux pratiques associées dans le voisinage immédiat de la haie : en effet les bords de parcelles à proximité des haies peuvent être utilisés et gérés de façon similaire au cœur de la parcelle (ex : culture, prairie jusqu'au pied de la haie), ou de façon très différenciée (ex : bande enherbée non fertilisée en bordure d'une parcelle cultivée). Ces analyses complémentaires peuvent être réalisées à partir du jeu de données recueillis dans cette étude.

Par ailleurs, l'hypothèse de réduction de l'échantillonnage à 2 distances de la haie doit être validée par l'acquisition de données sur d'autres sites, en particulier pour consolider la relation observée dans cette étude entre les stocks additionnels totaux intégrant tout le voisinage de la haie et les stocks additionnels intégrés uniquement sur le premier mètre.

4.2 – Éléments évaluatifs

4.2.1 – Difficultés rencontrées

La période de relevé des données de terrain devait être réalisée pendant la pandémie du COVID. Le travail a donc pris du retard et il n'a pas été possible de compléter le jeu de données sur davantage de haies issues du deuxième échantillonnage réalisé dans les mesures biomasse.

4.2.2 – Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles

Ce projet peut permettre de travailler sur la création d'un référentiel de données carbone à l'échelle nationale. Il permet de compléter et confirmer les données déjà produites dans le cadre du projet carbocage et en particulier d'apporter un référentiel de base pour la région Haut de France.

4.2.3 – Indicateurs de suivis

Indicateurs prévus dans le projet	Réalisations finales
4 territoires pédoclimatiques dans 4 régions de France	3 territoires dans trois régions étudiées : Normandie (Orne) 8 Bourgogne (Nièvre et Yonne) 7 Hauts de France (Aisne et Nord) 8
80 haies mesurées en carbone des sols	23 haies mesurées – 96 échantillons de sols

4.2.4 – Indicateurs de résultats

Livrables prévus	Livrables réalisés
L2.41 Rapport sur l'identification des intérêts et difficultés méthodologiques de l'évaluation du gisement de biomasse et stockage de carbone bocagers à partir des données disponibles (données issues de traitements numériques et de photo-interprétation, données descriptives et quantitatives de la biomasse et carbone collectées)	Réalisé
L2.42 Production d'un premier référentiel d'accroissement annuel de biomasse et stockage de carbone des haies dans différentes situations en France.	Produit avec fiche de synthèse de présentation des résultats rédigée
	Méthode simplifiée avec fiche de synthèse de présentation rédigée

PARTIE 5 – ANNEXES

Bibliographie

- Alexander, E.B. 1980. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44 : 689–692.
- Arrouays, D.; Balesdent, J.; Germon, J.C.; Payet, P.A.; Soussana, J.F.; Stengel, P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse. Paris: INRA, Expertise scientifique collective. 36p.
- Balesdent, J. ; Recous, S. 1997. Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage du carbone dans quelques sols cultivés français. *Canadian Journal of Soil Science* 77(2) : 187-193.
- Biffi, S.; Chapman, P.J.; Grayson, R.P.; Ziv, G. 2022. Soil carbon sequestration potential of planting hedgerows in agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management*, 307: 114484.
- Martin, M.P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G. and Arrouays, D. (2009), Optimizing Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density Using Boosted Regression Trees. *Soil Science Society of America*, 73: 485-493.
- Cousin, I. ; Ly, A. ; Bessard Duparc, P. ; Champolivier, L. ; Bémicot, M-H. 2018. Evaluating pedotransfer functions for the estimation of soil bulk density on cultivated fields. 21. International Soil Tillage Research Organization (ISTRO). 2018 ISTRO Conference, Sep 2018, Paris, France.
- Crossland M., 2015. Growing local energy. The carbon sequestration potential of hedges managed for woodfuel. The Organic Research Center. 41p.
- Follain, S.; Walter, C.; Legout, A.; Lemerrier, B.; Dutin, G., 2007. Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape. *Geoderma*, 142 : 80-95.
- Ford, H.; Healey, JR.; Webb, B.; Pagella, TF.; Smith, AR. 2019. How do hedgerows influence soil organic carbon stock in livestock-grazed pasture? *Soil Use and Management*, 35: 576– 584.
- Jamagne, M. 1973. Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. *Environnement et Société*. Université de Liège, Français.
- Lacoste, M. 2012. Evolution des sols à l'échelle du paysage sous des conditions de changements climatique et de structure du paysage. Thèse de doctorat Agrocampus Ouest Rennes. 241 p.
- Manrique, L.A. ; Jones, C.A. 1991. Bulk density of soils in relation to physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal* 55:476–481.
- Paulsen, H.M.; Bauer, B. 2008. Soil organic carbon stocks in hedge-banks as agricultural marginal areas. *Ressortforschung für den ökologischen Landbau* : 73-80.
- Pellerin, S. ; Bamière, L. et al., 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), 108 p.
- Recous, S.; Coppens, F.; Abiven, S.; Garnier, P.; Merckx, R. 2008. Carbon and nitrogen dynamics in soils: Effects of residue quality and localization. In: *Systems for enhancing management of agroforestry systems*. Vienna: International Atomic Energy Agency, p. 99.
- Upton, M. A.; P. J. Burgess. 2013. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system. *Plant and Soil*, 373(1-2): 43-58.
- Van Den Berge, S.; Vangansbeke, P.; Baeten, L. et al. 2021. Soil carbon of hedgerows and 'ghost' hedgerows. *Agroforest Syst* 95, 1087–1103.
- Van Vooren, L.; Reubens, B.; Ampoorter, E. et al. 2018. Monitoring the Impact of Hedgerows and Grass Strips on the Performance of Multiple Ecosystem Service Indicators. *Environmental Management* 62 : 241–259.
- Viaud, V.; Kunnemann, T. 2021. Additional soil organic carbon stocks in hedgerows in crop-livestock areas of western France. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 305 : 10174.

Walter, C., Merot, P., Layer, B., Dutin, G., 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19 (3) : 201-207.

Résumé :

Élaboration de méthodes simplifiées pour mesurer la production de biomasse et le stockage de carbone des haies en vue d'établir des références France entière.

Les haies bocagères sont une source de biomasse pour développer les ressources renouvelables des territoires agricoles. Leur préservation et leur maintien sont aussi une solution pour stocker davantage de carbone dans les parcelles. Cependant les données disponibles sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services. Par ailleurs, pour collecter des références à grande échelle, les méthodes connues aujourd'hui sont souvent complexes et coûteuses à mettre en place. À partir d'un échantillon de 98 haies mesurées dans les 4 régions différentes (Normandie, Hauts-de-France, Pays de Loire et Bourgogne-Franche-Comté), les partenaires du projet ont modélisé des méthodes simplifiées de cubage des haies de taillis d'arbustes, d'arbres et de têtards, de mesure de stockage du carbone dans les sols des haies, et ont vérifié les coefficients de conversion utilisés par les opérateurs dans les mesures biomasse et ont étudié les facteurs (pédoclimatiques)

qui influent sur les résultats afin de proposer des cadres d'échantillonnage.

Par ailleurs, ils confirment ou apportent des données de références dans les territoires étudiés sur la productivité des haies (volume et accroissement, tonnage et compartiment de stockage de carbone).

À partir de ce travail, une diffusion d'une méthode simplifiée de mesure biomasse et carbone des haies peut être envisagé. Il est cependant nécessaire de poursuivre le travail pour affiner la robustesse des modèles, de compléter les méthodes biomasse sur les arbres de hauts jets et d'approfondir les mécanismes sur le stockage de carbone au pied des haies.

Pour citer ce rapport :

VIAUD Valérie, LESAINTE Lucas, INRAE, COULON Frédéric, SOLAGRO, BETOLAUD Sylvain, NEVOUX Laurent, CANONNE Dorine, SCIC B2E (Bois Bocage Energie), MORET Catherine Afac-Agroforesteries. 2022. Évaluation des stocks et des flux de biomasse et carbone des haies, tests métrologiques et premières références dans 4 régions en France. 64 pages

En savoir plus sur Resp'haies :

Le projet de recherche et développement RESP'HAIES (RESilience et Performances des exploitations agricoles liées aux HAIES) s'est déroulé de 2019-2022, avec la participation de onze organismes de la recherche, du développement et de l'enseignement dans l'objectif est de renforcer les connaissances sur la thématique des haies autour de quatre axes :

- **Action 1** - productivité et cubage des haies et apports de la géographie pour caractériser les haies,
- **Action 2** - services écosystémiques liés aux haies : biodiversité, ruissellement, carbone,
- **Action 3** - performances technico-économiques des exploitations agricoles liées aux haies,
- **Action 4** - conceptions et tests de séquences pédagogique sur les haies.

Retrouvez tous les résultats du projet sur <https://afac-agroforesteries.fr/resphaies/>

Projet soutenu par :

Le projet bénéficie également du soutien de :



Partenaires du projet :

