

# Caractérisation initiale d'un dispositif expérimental in situ pour l'étude de travaux préparatoires à la plantation en vue d'un renouvellement forestier

Master 1 Sciences de la Terre et des planètes, environnement  
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie-Géochimie Environnementale (HHGE)  
Stage prévu du 2 avril au 31 juillet 2024

Rapport d'avancement à la date du 13 juin 2024

**Stagiaire** : Sofia Dolgikh, M1 HHGE 2024, Sorbonne Université

**Laboratoire** : ECODIV EA 1499 / USC – RUN – INRAe

**Encadrant** : Lucas Poullard, doctorant ECODIV

## Table des matières

Introduction.....	1
Objectifs et hypothèses .....	2
Etat de l'art.....	3
<b>Cycle du Carbone.....</b>	<b>3</b>
<b>Matières organiques du sol et séquestration de carbone.....</b>	<b>4</b>
<b>Forêts, Sols Forestiers et leurs rôles dans le cycle du carbone .....</b>	<b>7</b>
<b>Impact du Changement Climatique sur le Cycle du Carbone .....</b>	<b>8</b>
<b>Pratiques de Gestion Forestière et Préparation Mécanisée du Site (PMS) .....</b>	<b>9</b>
Matériels et méthodes.....	10
<b>Présentation de la parcelle expérimentale.....</b>	<b>10</b>
<b>Description du dispositif expérimental.....</b>	<b>12</b>
<b>Campagnes d'Échantillonnage.....</b>	<b>13</b>
<b>Description du traitement des échantillons pour le COS : .....</b>	<b>15</b>
Résultats et discussion .....	16
Conclusion .....	18
Bibliographie .....	19

## Introduction

Le cycle du carbone est l'un des cycles biogéochimiques clés qui soutiennent la vie sur Terre. Il implique de nombreux processus d'origines biologiques, géologiques, chimiques et physiques (Valery et Pansu, 2022). Ces processus permettent des échanges entre différents compartiments, notamment entre l'atmosphère et la biosphère par le biais de la photosynthèse et de la respiration des organismes. Ce cycle a un impact significatif sur les conditions climatiques et la productivité biologique des écosystèmes (Osipov A. F., 2017). Les stocks de carbone dans le réservoir de la biosphère et plus particulièrement dans la végétation sont de l'ordre de 450 à 650 Gt (Giga tonnes), les sols quant à eux stocks plus de trois fois le contenu de la végétation (1 500 à 2 400 Gt) (IPCC, 2013). Dans ce compartiment, les sols forestiers jouent un rôle important, car ils peuvent stocker de grandes quantités (environ 90t/ha) de carbone organique du sol (COS ; ADEME, 2021). Le taux de séquestration du COS, ainsi que la qualité des stocks, dépendent de beaucoup de facteurs, comme les interactions complexes entre le climat, les types de sols, la composition des espèces d'arbres et la composition chimique de la litière, déterminée par les espèces d'arbres dominantes. Les capacités de séquestration du carbone varient également selon le type de forêt (tempérée, tropicale et boréale), notamment en raison des différentes périodes et vitesses de décomposition et minéralisation de la matière organique dans des conditions climatiques contrastées.

Le changement climatique peut aussi favoriser la croissance des forêts en augmentant la disponibilité de l'azote minéral et grâce à l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, ce qui peut en partie compenser les émissions de carbone du sol dues au réchauffement (Lal, 2005, p. 242). La séquestration du carbone dans les sols forestiers peut devenir une stratégie importante pour l'atténuation du changement climatique (Pellerin et al., 2020). Avec une gestion sylvicole appropriée, il est possible non seulement d'augmenter la séquestration du carbone, mais aussi d'améliorer la biodiversité et la résilience des écosystèmes. Il est donc essentiel de séquestrer davantage de carbone dans ces écosystèmes et de développer des stratégies de gestion forestière adaptées (Jandl et al., 2007, p. 254).

Un éventail de possibilités s'offre aux gestionnaires forestiers pour conduire au mieux ces écosystèmes et répondre aux enjeux du changement climatique. Parmi ces possibilités, la préparation mécanisée du site (PMS) favorise l'établissement rapide, la croissance précoce et la bonne survie des plants (Palmgren, 1984; Johansson, 1994,). Dans ce sens, elle permet de réaliser des substitutions d'essences plus rapidement que le déplacement spontané, de maintenir une production de bois suffisante pour répondre aux besoins de la société et d'assurer la fourniture d'autres services écosystémiques prodigués par les forêts. En même temps, la préparation mécanisée du site peut stimuler la perte de carbone organique du sol en détruisant les agrégats du sol, rendant le carbone facilement accessible à la décomposition microbienne et conduit à son dégagement ultérieur dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub> (Mayer et al., 2020). À une profondeur de 0 à 60 cm, en particulier dans les 30 cm supérieurs, la préparation mécanisée du site peut entraîner des pertes significatives de carbone jeune et ancien. Le carbone ancien, situé plus en profondeur dans le profil du sol (Balesdent et al., 2018), peut être soumis à la lixiviation et au lessivage, surtout en cas d'humidité accrue ou de pluies intenses (Mallik et Hu, 1997, p. 266). Cela peut entraîner le transfert du carbone des formes stables à des formes plus actives, sujettes à la minéralisation microbienne. La PMS peut également modifier la répartition spatiale du COS, en lien avec le type d'outil utilisé, sans pour autant affecter significativement les stocks de COS à l'échelle du peuplement (Quibel, 2020 : Impacts de la préparation du sol lors de la phase de plantation sur la dynamique des matières organiques et la fonction de stockage du Carbone dans les sols forestiers). Il est donc primordiale de comprendre l'effet des différentes méthodes de préparation mécanisée du site sur la dynamique du COS.

Pour étudier les effets de la PMS sur les sols et notamment sur les stocks de COS, le projet de recherche CASTOR (Comportement du CARbone STOcké dans les sols lors de la Reconstitution des peuplements forestiers par plantation avec préparation mécanisée du site ; Financement ADEME) porté par l'ONF (Office National des Forêts) et l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) a été mis en place en 2023, dont une partie constitue le support d'un projet de thèse (<https://renfor.hub.inrae.fr/projets/castor>). L'objectif général du projet CASTOR est d'identifier et de documenter des méthodes de PMS avant plantation offrant les meilleurs compromis entre réussite de la plantation et moindre perturbation des fonctions des sols. Ces fonctions portent sur différents aspects : les propriétés physiques du sol, les stocks de COS et les éléments minéraux, la diversité biologique du sol de différents taxons ainsi que l'impact sur les plants. Le projet de thèse quant à lui se focalise sur les effets de la PMS sur les stocks de COS et sur les processus de minéralisation. Le stage s'inscrit donc dans une partie du projet de thèse et se déroule au laboratoire ECODIV (Etude et COMpréhension de la bioDIVERSité ; partenaire du projet CASTOR) de l'Université de Rouen Normandie.

## Objectifs et hypothèses

Le stage a pour objectif d'étudier comment différentes méthodes de PMS travaillant sur des surfaces plus ou moins localisées affectent les flux et les stocks de COS avant et après PMS. Ce travail est réalisé à partir d'échantillons prélevés sur un dispositif expérimental *in situ* en forêt d'Eu, mis en place en 2023. Tout d'abord, il s'agit de préparer les échantillons de sols des différentes couches du profil de sol des modalités de PMS du dispositif, dans le but de déterminer la teneur en COS à l'analyseur élémentaire et la densité apparente. Les résultats d'analyses permettent ensuite de calculer les stocks de COS dans une approche synchronique (comparaison entre les modalités) et diachronique (comparaison avant et après PMS). En parallèle, des données de respiration du sol *in situ* préalablement acquises permettent de faire le lien entre stocks de COS et minéralisation. Le choix de travailler sur les stocks de COS à l'échelle du profil de sol s'explique par le fait que la littérature montre un manque de connaissance sur les horizons profonds du sol et le travail sur la respiration du sol s'explique par des résultats de travaux précédents montrant des impacts variables selon les outils de PMS utilisés (Collet et al., 2018 ; Quibel, 2020). Des hypothèses sont donc avancées, stipulant qu'à court terme **les méthodes de PMS impactent négativement les stocks de COS ainsi que leur redistribution au sein du profil de sol dans les zones travaillées** mais aussi que **les modalités de PMS décompactant le sol modifient les flux de CO<sub>2</sub> en augmentant la minéralisation du COS.**

Ce rapport se présentera donc en plusieurs parties. Tout d'abord, une présentation d'un état de l'art sur la thématique scientifique du stage. Ensuite, une partie matériels et méthodes permettant de décrire le dispositif expérimental, les échantillonnages réalisés ainsi que les traitements effectués sur les échantillons. La partie suivante permettra d'exposer des premiers résultats de stocks de COS et de respiration du sol *in situ*. À la suite de cela, ces résultats seront confrontés aux résultats décrits dans la littérature, puis la conclusion rappellera les points importants de ce rapport.

Pour information, le stage se déroule du 2 avril au 31 juillet, ce rapport est donc un rapport d'avancement et ne présentera que des résultats préliminaires qui seront approfondis en deuxième partie du stage.

## Etat de l'art

### Cycle du Carbone

Le cycle du carbone est un processus biogéochimique fondamental qui joue un rôle essentiel dans la régulation du climat terrestre et la productivité biologique des écosystèmes. La quantité totale de carbone (C) présente sur Terre est presque constante, cependant, les formes et les quantités de C présentes dans les différents compartiments biogéochimiques (atmosphère, biosphère, pédosphère, hydrosphère et lithosphère) ne le sont pas, et des transferts ont lieu en conséquence des cycles naturels ou des activités anthropiques (Podvezennaya et al., 2023, p. 1143).

La quantité de carbone dans l'atmosphère est relativement faible comparée à celle des autres compartiments (sauf la biosphère), où le C existe principalement sous des formes non gazeuses et n'affecte pas le climat. Cependant, depuis 1750, les niveaux de CO<sub>2</sub> atmosphérique ont considérablement augmenté en raison des activités humaines, dépassant les niveaux préindustriels (IPCC 2007). Il existe un lien clair entre les gaz à effet de serre et l'effet de serre de la Terre (IPCC 2007). Ces gaz piègent une partie du rayonnement sortant, réchauffant ainsi la planète. Bien que cet effet soit crucial pour maintenir une Terre habitable, il est actuellement nécessaire de stabiliser et de réduire les concentrations des gaz à effet de serre (GES) pour prévenir les changements climatiques dangereux. Jusqu'à récemment, les flux de carbone dans le système des interactions atmosphère-biosphère étaient régulés sans entrave par la couverture végétale. Cependant, la transformation de la structure proche de celle naturelle de la couverture végétale due aux incendies, aux coupes de bois, aux processus d'érosion sur les pâturages et les terres arables, ainsi que l'aliénation des terres naturelles pour divers types de construction, ont affaibli les mécanismes de régulation des flux de carbone dans la biosphère et la capacité de séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique par le biote. De plus, les processus qui séquestrent le C dans des compartiments non atmosphériques sont essentiels. Houghton (2007) a montré les changements des flux annuels de C entre l'atmosphère, l'hydrosphère et les compartiments terrestres en raison de l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> de 1850 à nos jours (Figure 1).

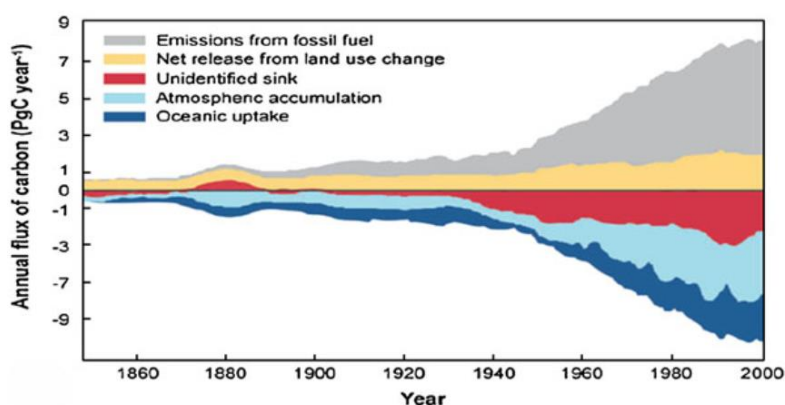


Figure 1

La hausse plus faible que prévue du CO<sub>2</sub> atmosphérique est due aux puits naturels dans les compartiments océaniques et terrestres (Ciais et al. 1995 ; Schindler 1999). Le "puits résiduel de C" dans le compartiment terrestre se trouve principalement dans les régions tempérées et boréales de l'hémisphère nord (Bousquet et al. 1999), bien que des études récentes indiquent que les forêts tropicales absorbent également une quantité significative de C d'origine humaine (Stephens et al.

2007). L'absorption de CO<sub>2</sub> par les océans pourrait diminuer avec la hausse des températures en raison de la loi de Henry, bien que les changements actuels de la température des océans aient probablement un impact mineur par rapport aux changements de concentration de CO<sub>2</sub>. Le rôle des écosystèmes terrestres dans ce processus reste incertain (Reay et al. 2007).

Dans la recherche de solutions pour réduire les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'attention s'est portée sur le rôle fonctionnel de la végétation, en particulier sur les forêts. Les forêts se distinguent par leur haute organisation, leur capacité de renouvellement et leurs périodes relativement longues de rétention du carbone, que ce soit dans les arbres eux-mêmes ou dans les débris végétaux qui se décomposent lentement. Ces caractéristiques en font des candidats prometteurs pour la séquestration du carbone atmosphérique (Podvezennaya et al., 2023, p. 1143). Cependant, pour maximiser cette capacité de stockage du carbone dans les sols forestiers, il est essentiel d'examiner non seulement les processus de séquestration naturels, mais aussi les interventions humaines telles que la préparation mécanisée du site (PMS) dans la gestion des sols (Mallik et Hu, 1997, p. 266). Étudier l'impact de la PMS sur la dynamique du carbone lors de la préparation du sol est particulièrement important et intéressant, car cela peut révéler de nouvelles stratégies pour augmenter le stockage du carbone dans les sols, contribuant ainsi aux efforts d'atténuation du changement climatique. En optimisant les pratiques de gestion des sols avant la plantation des forêts, il est possible d'améliorer leur capacité à séquestrer le carbone, ce qui pourrait jouer un rôle significatif dans la lutte contre le changement climatique.

## Matières organiques du sol et séquestration de carbone

La matière organique du sol est, simultanément, le composant du cycle du carbone le plus inerte des écosystèmes terrestres et le composant le plus dynamique des systèmes géologiques terrestres, la plaçant ainsi dans une position clé dans la biogéochimie du carbone. La grande taille et la durée de résidence potentiellement longue du réservoir de matière organique du sol en font un composant important du cycle global du carbone (Schlesinger 1977, Post et al. 1982, 1985). La Figure 2 montre la relation entre le réservoir de matière organique du sol et d'autres composants des écosystèmes terrestres mondiaux ayant des temps de renouvellement à la fois significativement plus longs et plus courts (Post et al. 1990).

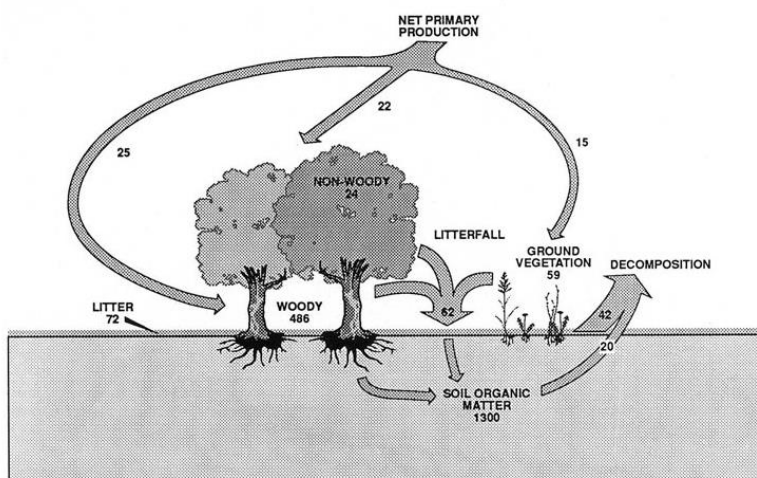


Figure 2

La séquestration du C dans le sol implique le transfert du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans le sol d'une unité terrestre par le biais de ses plantes. Génériquement, la séquestration du C dans le sol fait référence à la capture et au stockage sécurisé du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans la pédosphère de manière à augmenter également son temps de résidence moyen et à minimiser les puits de réémission. La capacité de séquestration du COS est régie par des interactions complexes entre les réservoirs de COS et les structures des communautés microbiennes au fil du temps, ainsi que par les facteurs biotiques et abiotiques et le degré d'association du COS avec les composants inorganiques (Lal et al., 2015, p. 80).

Augmenter la séquestration du carbone dans les profils de sol peut être possible en adaptant des techniques de gestion des sols adéquates. Bien que les concentrations de COS dans les sols de surface soient généralement plus élevées que celles en profondeur. Lorsque le sol profond coïncide avec un enracinement profond, le dépôt biologique de C provenant des racines et de leur biote associé en profondeur est inévitable (Lal et al., 2015, p. 80). La formation d'agrégats du sol est l'un des mécanismes de stabilisation du COS. La compréhension des mécanismes physiques de la séquestration et de la stabilisation du COS dans les sols a suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs depuis des décennies et il est important ici de parler davantage de la matière organique du sol.

La matière organique du sol se compose d'une diversité de composés chimiques avec des temps de renouvellement très variés (Derrien et al., 2016). Selon la vision historique de la théorie de l'humification, la décomposition de la matière organique est une transformation continue des substances humiques en substrats plus résistants et en CO<sub>2</sub>. La théorie de l'humification, qui a dominé pendant une longue période, considérait le processus de transformation des résidus végétaux et animaux dans le sol en substances humiques stables comme le mécanisme fondamental d'accumulation du carbone organique dans le sol. Selon cette théorie, la matière organique du sol passe par plusieurs étapes de transformation, allant des résidus frais aux substances partiellement décomposées et, finalement, aux composés humiques stables (Schmidt et al., 2011).

L'humus peut être davantage caractérisé chimiquement par extraction séquentielle de la matière organique par des alcalis et des acides pour donner les fractions définies opérationnellement et chimiquement hétérogènes des acides humiques, des acides fulviques et de l'humine insoluble (Stevenson 1982, voir Figure 3). Ces substances humiques, considérées comme composées de molécules complexes et de haut poids moléculaire, peuvent persister dans le sol pendant de longues périodes en raison de leur résistance à une décomposition ultérieure.

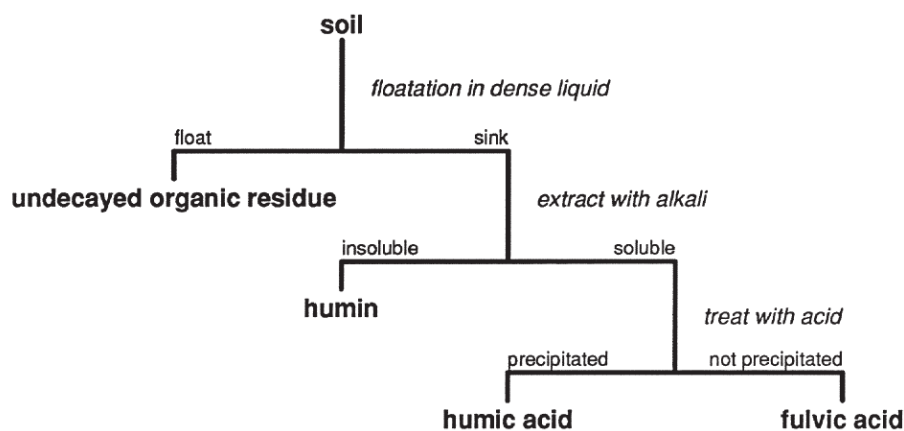


Figure 3

Cependant, cette théorie a commencé à être critiquée au cours des dernières décennies à mesure que de nouvelles données ont été accumulées et que les méthodes analytiques se sont perfectionnées.

Des recherches récentes ont remis en question les conceptions traditionnelles de l'humification. Les méthodes analytiques modernes ne confirment pas l'existence de substances humiques uniques, telles que les acides humiques et fulviques, sous les formes décrites dans la théorie de l'humification. Au lieu de cela, la matière organique du sol est représentée par un mélange complexe de divers composés organiques.

Lehmann et Kleber en 2015 ont révisé la compréhension de la matière organique du sol. Ils ont proposé un modèle de continuum du sol qui se concentre sur la capacité des organismes décomposeurs à accéder à la matière organique du sol et sur la protection de cette matière contre la décomposition fournie par les minéraux du sol. Autrement dit, la stabilisation du carbone organique se produit principalement grâce à l'interaction avec les particules minérales du sol. Cette interaction protège la matière organique de la décomposition microbienne.

Un autre aspect de leur travail est que la matière organique du sol est une dynamique, où les processus de décomposition et de synthèse se produisent constamment. La stabilisation de la matière organique du sol est donc due non seulement à des facteurs chimiques, mais aussi à des facteurs physiques et biologiques.

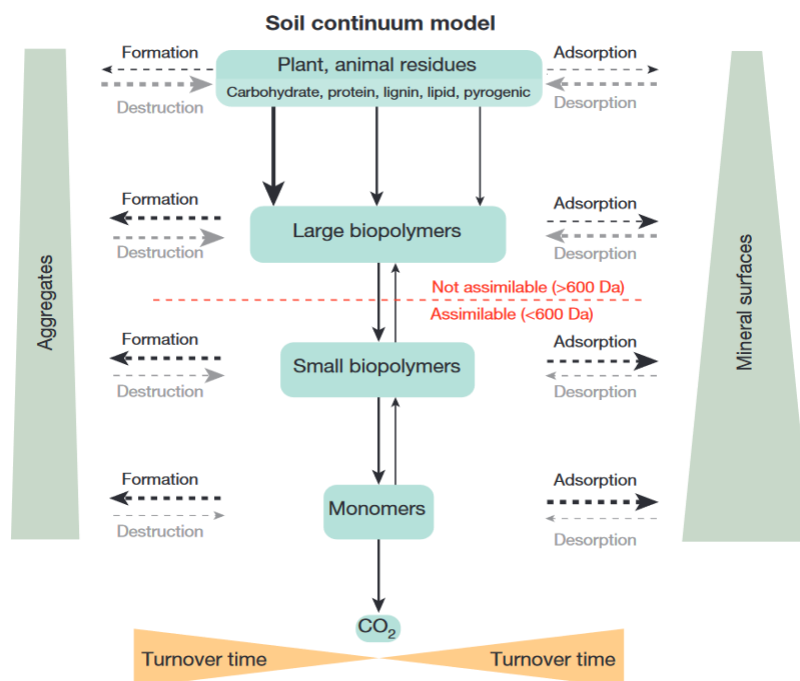


Figure 4

Selon le concept de modèle de continuum du sol, la matière organique existe sous forme d'un continuum de fragments organiques qui sont continuellement transformés par la communauté des décomposeurs en molécules de plus petite taille (Figure 4). La dégradation des grandes molécules entraîne une diminution de la taille du matériau végétal primaire avec une augmentation simultanée des groupes polaires et ionisables, augmentant ainsi la solubilité dans l'eau. Parallèlement, la protection contre la décomposition ultérieure augmente grâce à une plus grande réactivité envers les surfaces minérales et l'incorporation dans les agrégats (Lehmann et Kleber, 2015, p. 62). Cette compréhension met en évidence les interactions complexes entre la matière organique et les minéraux du sol, soulignant comment ces interactions peuvent stabiliser le carbone dans la matrice du sol.



Cependant, malgré ces mécanismes de stabilisation, la qualité et la quantité de matière organique du sol peuvent varier considérablement en fonction de divers facteurs environnementaux et biologiques.

## Forêts, Sols Forestiers et leurs rôles dans le cycle du carbone

La quantité de carbone stockée dans le sol est déterminée par l'équilibre de deux processus biotiques - la productivité de la végétation terrestre et la décomposition de la matière organique. Chacun de ces processus est influencé par des facteurs physiques et biologiques importants. Ceux-ci incluent le climat ; les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol ; et la composition de la végétation. La température et les précipitations montrent des relations frappantes avec la teneur en carbone du sol (Figure 5).

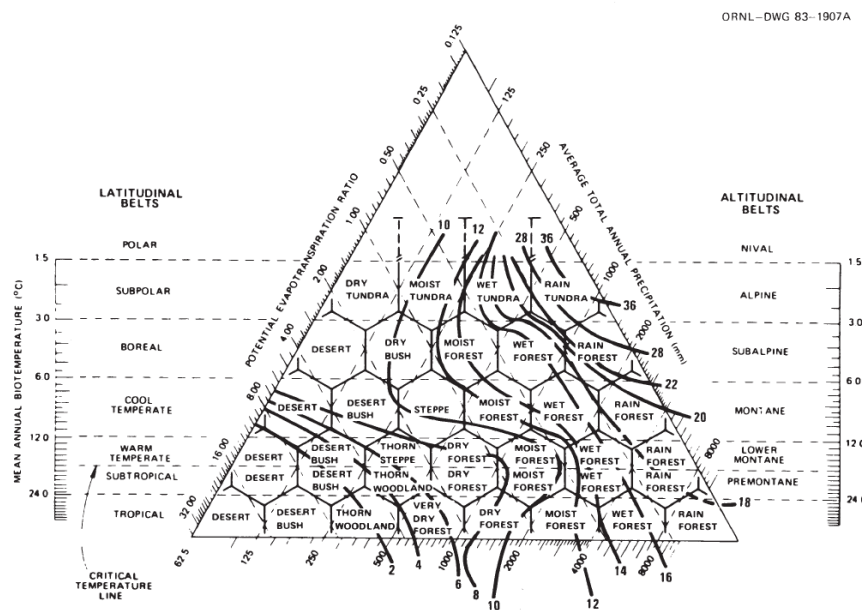


Figure 2. Soil carbon concentration ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) as a function of Holdridge Life Zone (from Post et al. 1985 and reprinted by permission from Nature vol. 317 p. 614 Copyright © 1985 Macmillan Magazines Ltd.).

Figure 5

Le climat affecte le stockage du carbone dans le sol en influençant les taux de production végétale et les taux de décomposition de la matière organique (Schlesinger 1985). La concentration en carbone du sol augmente généralement avec l'augmentation des précipitations, et pour un niveau donné de précipitations, il y a une augmentation du carbone du sol avec la diminution de la température (Schlesinger 1985). Les concentrations les plus élevées de carbone du sol se trouvent dans les régions froides et humides. Ici, les taux de production végétale sont faibles, mais les taux de décomposition sont extrêmement bas en raison des basses températures du sol et des conditions saturées en eau. Les sols tropicaux humides contiennent également une concentration élevée de carbone en raison des taux élevés de production végétale. Dans les régions désertiques avec de faibles précipitations, le stockage du carbone dans le sol est faible et se trouve principalement sous forme inorganique (Schlesinger 1985). Les écosystèmes de marais et de zones humides côtières ont des sols avec des concentrations très élevées de carbone. Ces écosystèmes, dans des conditions non perturbées, accumulent du carbone dans leurs sols en raison d'une production excédentaire par rapport à la décomposition (Post et al. 1990).

La production végétale dépend non seulement du climat, de l'apport en nutriments provenant de l'altération géochimique et d'autres facteurs abiotiques, mais aussi de facteurs biotiques, en particulier la composition des espèces végétales (Aber and Melillo 1982; Meentemeyer 1978). La décomposition

est également en partie contrôlée par la composition des espèces. Chaque espèce végétale terrestre produit et rejette un mélange caractéristique de composés carbonés, chacun ayant une dégradabilité variable. Cette gamme de dégradabilité peut être résumée par la teneur en lignine et en azote de la matière organique (Aber and Melillo 1982; Meentemeyer 1978). Par exemple, les prairies ont une productivité quelque peu inférieure à celle des forêts et ne produisent aucun matériau ligneux se décomposant lentement. Néanmoins, les prairies ont une teneur en matière organique du sol très élevée car les herbes des prairies allouent deux fois plus de production aux racines et aux talles qu'aux feuilles aériennes (Sims and Coupland 1979).

## Impact du Changement Climatique sur le Cycle du Carbone

Le changement climatique peut avoir des effets contradictoires sur les écosystèmes forestiers. D'une part, des températures plus élevées et des concentrations accrues de CO<sub>2</sub> peuvent stimuler la croissance des arbres et augmenter la séquestration du carbone par la biomasse forestière (Norby et al., 2005). D'autre part, ces mêmes conditions peuvent accélérer la décomposition de la matière organique dans le sol, augmentant les émissions de CO<sub>2</sub> et réduisant ainsi les stocks de CO<sub>2</sub> (Trumbore, 2009).

Les rétroactions entre le carbone organique du sol et le climat ne sont pas entièrement comprises, nous ne sommes donc pas pleinement capables de répondre à ces questions, mais nous pouvons les explorer en utilisant des modèles numériques du cycle du carbone organique du sol. Nous pouvons non seulement simuler les rétroactions entre le changement climatique et les écosystèmes, mais aussi évaluer les options de gestion et analyser les stratégies de séquestration du carbone et de productions de biocarburants (Schmidt et al., 2011, p. 49).

Le changement climatique peut affecter la productivité des écosystèmes, l'allocation de biomasse aérienne par rapport à la biomasse souterraine et la population microbienne (Joyce et Birdsey, 2000). Cependant, la réponse des écosystèmes forestiers à l'augmentation projetée de la température est complexe. Le climat et les perturbations interagissent pour influencer les modèles de végétation latitudinale et le stockage du carbone dans le sol (McGuire et al., 2002). De plus, ce sont les processus à l'échelle du paysage qui contrôlent les flux régionaux de carbone. Il est donc difficile d'extrapoler les mesures au niveau du site à des échelles régionales (Hobbie et al., 2000).

Melillo et al. (2002) ont rapporté les résultats d'une expérience de réchauffement menée pendant une décennie dans une forêt de feuillus de moyenne latitude. Ils ont observé que le réchauffement du sol accélérerait la décomposition de la matière organique du sol et les flux de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère. Cependant, cette réponse était faible et de courte durée en raison de la taille limitée du stock de carbone labile du sol, ce qui peut ne pas être le cas dans les sols des régions de toundra et de taïga. Le réchauffement a également augmenté la disponibilité de l'azote minéral pour les plantes, ce qui dans une forêt limitée en azote pourrait stimuler le stockage de carbone dans la biomasse pour compenser la perte de carbone des sols (Lal, 2005, p. 251).

Comme mentionné précédemment, l'appauvrissement du carbone du sol est accentué par la dégradation du sol et exacerbé par une utilisation inappropriée des terres et une mauvaise gestion des sols. Ainsi, l'adoption d'une utilisation restauratrice des terres et de pratiques de gestion recommandées sur les sols agricoles peut réduire le taux d'enrichissement en CO<sub>2</sub> atmosphérique tout en ayant des impacts positifs sur la sécurité alimentaire, les agro-industries, la qualité de l'eau et l'environnement (Lal, 2004, p. 1). La phase de régénération des arbres offre la meilleure opportunité de changer les espèces d'arbres et la structure de l'écosystème forestier, et cette phase est une étape initiale importante dans la restauration des forêts.

## Pratiques de Gestion Forestière et Préparation Mécanisée du Site (PMS)

Une gestion forestière adaptée est essentielle pour maximiser la séquestration du carbone et atténuer les effets du changement climatique. Des pratiques telles que la préparation mécanisée du site, le drainage adéquat du sol, la culture d'espèces à haute production primaire nette, et l'application d'engrais peuvent considérablement augmenter les stocks de carbone dans le sol (Jandl et al., 2007). Cependant, ces pratiques peuvent également avoir des effets négatifs, comme la destruction des agrégats du sol et la libération de carbone labile, qui est plus susceptible d'être décomposé et libéré sous forme de CO<sub>2</sub> (Six et al., 2000).

La préparation mécanisée du site intervient lors de la phase de renouvellement du peuplement forestier. La PMS est une technique de gestion forestière couramment utilisée pour favoriser l'établissement rapide et la croissance précoce des semis. Cette méthode engendre une altération du sol, comme des changements dans sa structure, sa densité apparente, son microclimat, ou provoque des mélanges d'horizons (Egnell et al., 2015; Jandl et al., 2007; Örländer et al., 1996). Ces altérations affectent de manière variable les stocks de carbone organique du sol (Mayer et al., 2020; Strömngren et al., 2013; Sutinen et al., 2019), pouvant résulter en une augmentation de la décomposition par les micro-organismes, une accélération de l'érosion (notamment hydrique et éolienne pour les tas de récolte et les billons) (Paul et al., 2002), ou encore une perte de carbone par lessivage (Piirainen et al., 2007).

La PMS est une large catégorie de méthodes de préparation du site impliquant généralement l'utilisation de grosses machines lourdes avec certains outils attachés pour préparer le sol sur une zone pour la régénération des peuplements. Il en existe trois types principaux (scarification, monticule (travail à la mini-pelle) et sous-solage) qui sont couramment utilisés aujourd'hui (Figure 6). Le sous-solage est utilisé pour augmenter l'aération du sol, l'infiltration et le drainage de l'eau du sol, pour réduire la densité apparente du sol, et aussi pour lutter contre la végétation compétitrice. Contrairement aux techniques de sous-solage, le travail à la mini-pelle (ex. sous-soleur multifonction) crée des zones de plantation surélevés et influence la structure du sol (Sutton, 1993). Il élimine la végétation et les débris à la surface du sol puis décompacte le sol avec sa dent de sous-solage, ce qui entraîne un sol inversé ou mélangé au-dessus de la couche organique ou du sol nu. Les objectifs des travaux à la mini-pelle sont de créer des points de plantation surélevés exempts d'engorgement et avec peu de concurrence de la végétation. De plus, l'augmentation de la température du sol et de la disponibilité des nutriments, la réduction de la densité apparente du sol et une bonne aération du sol sont mentionnées comme des avantages pour la croissance des racines et des semis (Ritari et Lähde, 1978; Londo et Mroz, 2001; Kabrick et al., 2005).

Un des impacts principaux de ces méthodes est le déstockage du carbone organique du sol. Selon l'intensité, la préparation de site utilisant des méthodes de PMS peut entraîner un impact sur des zones relativement vastes et perturber profondément le sol. En général, il y a une perte de carbone du sol après la PMS, qui tend à augmenter avec une perturbation accrue du sol (Jandl et al.). Dans les zones traitées, la matière organique est souvent mélangée au sol minéral ou enterrée sous celui-ci et est donc exposée à des conditions de décomposition et de minéralisation différentes par rapport aux zones non traitées. La perturbation du sol modifie le microclimat et stimule la décomposition de la matière organique du sol (Johansson 1994). Cependant, la performance des semis et la séquestration du carbone sont également favorisées par la PMS dans la plupart des études, ce qui peut compenser ou surpasser les pertes de carbone du sol dans la réponse globale de l'écosystème (Jandl et al. 2007).

Il existe un risque qu'à des stades ultérieurs du développement du peuplement, la croissance soit retardée en raison du lessivage des éléments de l'écosystème dû à la PMS (Lundmark 1988). Bien que

les réserves de nutriments puissent être affectées (par exemple, Yildiz et al. 2009), peu d'études ont montré que la PMS avait un impact négatif sur la productivité à long terme des arbres cultivés. La plupart des méthodes de PMS peuvent provoquer l'érosion des sols si elles ne sont pas soigneusement mises en œuvre et adaptées aux caractéristiques spécifiques du site et au climat (Alcázar et al. 2002). La PMS peut influencer la biodiversité, du moins à court terme. Les projets de restauration forestière sont de plus en plus courants dans le monde entier, et la plantation d'arbres en est presque toujours un élément clé. La faible performance des semis causée, par exemple, par la végétation concurrente, un excès d'eau ou une sécheresse, ou encore des sols compactés, peut entraîner des échecs de restauration. Diverses méthodes de PMS utilisant des machines lourdes sont des outils importants pour contrer ces problèmes (Lof et al. 2012). Des méthodes telles que la scarification, le travail à la mini-pelle et le sous-solage entraînent également de multiples interactions sur les propriétés physiques et chimiques des sols qui affectent la performance des plantes, ce qui rend difficile de déterminer la relation de cause à effet réelle de toute réponse positive des semis. En outre, ces réponses peuvent également varier en fonction des conditions climatiques et des types de sites (Lof et al. 2012).

Par conséquent, la base scientifique pour la mise en œuvre de la PMS lors de la restauration forestière est plutôt faible, et il est nécessaire de mener davantage de recherches pour améliorer la compréhension.

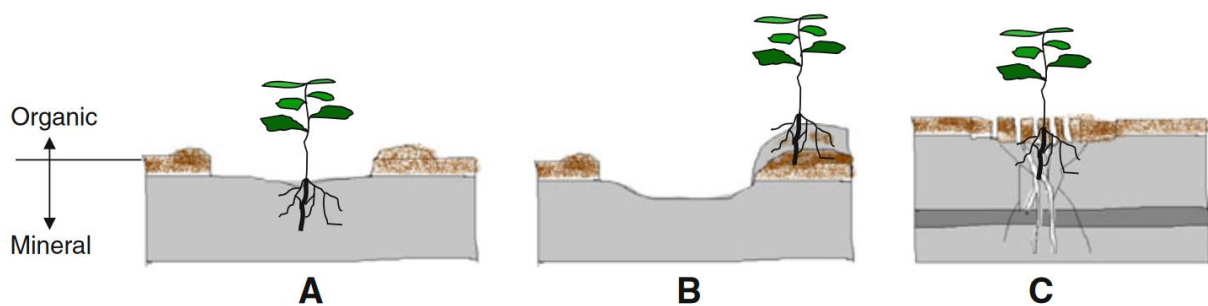


Figure 6. Schematic description of three types of mechanical site preparation and their main effect on soil structure: scarification (A), mounding (B) and subsoiling (C). Dark grey area below mineral soil represent hardpan in C. Normal planting spots are indicated

## Matériels et méthodes

### Présentation de la parcelle expérimentale

La parcelle n°80 de la forêt domaniale indivise d'Eu, située à environ 1h20 du laboratoire ECODIV a été choisie pour abriter le dispositif expérimental *in situ* qui répondait au mieux aux critères de choix des membres du projet.

### Présentation rapide la forêt d'Eu

La forêt est située en Normandie sur le plateau entre les vallées de la Bresle et de l'Yères. Le hêtre couvre environ 70 % de la surface et 20% est occupé par le chêne. Les essences diverses (charme, merisier, érable, pommier et poirier sauvages) représentent 5 %, tout comme les essences résineuses (douglas, mélèze et épicéa) qui occupent également 5 % de la surface forestière.

### Localisation et conditions de la parcelle n°80



- Région Normandie
- Département de la Seine-Maritime
- Unité Territoriale Eu-Bray Nord
- Forêt Domaniale indivise d'Eu
- Parcelle n°80
- Coordonnées géographiques : 49°57'31.3"N  
1°29'32.7"E

Figure 7

Topographie	Plateau dominé par des limons
Climat	Tempéré océanique avec peu d'écart de température
Température moyenne des temp. min mensuelles	6,1°C
Température moyenne des temp. max mensuelles	13,9°C
Pluviométrie annuelle moyenne	881 mm
Roche mère	Craie argileuse
Type de sol	Neoluvisol sur craie

Tableau 1. Conditions stationnelles du site expérimental

### Critères de choix du site

- Sol à texture équilibré, à dominante limoneuse
- Zone Nord-Ouest (DT Seine-Nord) : dans un périmètre d'1h/1h30 de Rouen
- En forêt publique
- Pas de hannetons
- Pas d'éléments grossiers sur 60 cm
- Pas d'engorgement sur 50-60 cm
- Pas de post scolytes
- Surface minimum de 3-4 ha
- Antécédent feuillus

### Caractéristiques de la parcelle

La parcelle d'une surface d'environ 4,8 ha possède un sol à dominante limoneuse et une en charge en silex faible à moyenne (apparition entre 30-50 cm).

### Historique de la parcelle

Le peuplement de hêtre de la parcelle a été exploité en 2016 puis la coupe des derniers semenciers a été effectuée une fois que la régénération naturelle était acquise. Cette régénération a été considérée comme un échec en 2019 à cause de la forte mortalité des plants due à un gel tardif (gel printanier). Suite à cela, les gestionnaires forestiers ont décidé de réaliser une plantation de chêne sessile, pour augmenter leurs chances d'avoir un peuplement sur cette parcelle. Le choix de changer d'essence (passage du hêtre au chêne sessile) s'explique par le fait que le hêtre a un avenir incertain localement

et la plantation était un bon moyen de substituer l'essence. Dans le cadre du projet, la parcelle n°80 a donc été sélectionnée car elle répondait au mieux aux critères initiaux de choix du site.

## Description du dispositif expérimental

Préalablement à la mise en place du dispositif et notamment de la disposition des unités expérimentales (UE), une caractérisation de la parcelle a été réalisée. Plus en détails, une caractérisation de l'hétérogénéité spatiale par analyse MIRS (Middle Infra Red Spectrometry), une caractérisation spatiale de la charge en éléments grossiers, une mesure de l'effet du broyage du parterre de coupe (sur les rémanents forestiers, les biomasses aériennes et racinaires ; réalisé en août 2023), des mesures de respiration du sol *in situ* ainsi qu'une estimation des stocks de COS ont été réalisés. Cette caractérisation permet de positionner au mieux le dispositif expérimental et de pouvoir répondre aux potentiels questionnements futurs lors de l'interprétation des résultats du projet.

Dans ce rapport seules les campagnes d'échantillonnages concernant les stocks de COS et les respirations du sol *in situ* seront détaillées.

## Mise en place du dispositif

Le dispositif a donc été installé en octobre 2023 (Figure 8) :

- Placement de 19 unités expérimentales, soit 4 répétitions des 5 modalités (sauf pour la modalité Végétation spontanée qui n'a que 3 répétitions)
- Surface par UE d'environ 2000m<sup>2</sup>
- Positionnement des cloisonnements sylvicoles et d'exploitations selon le schéma de plantation habituel des responsables forestiers

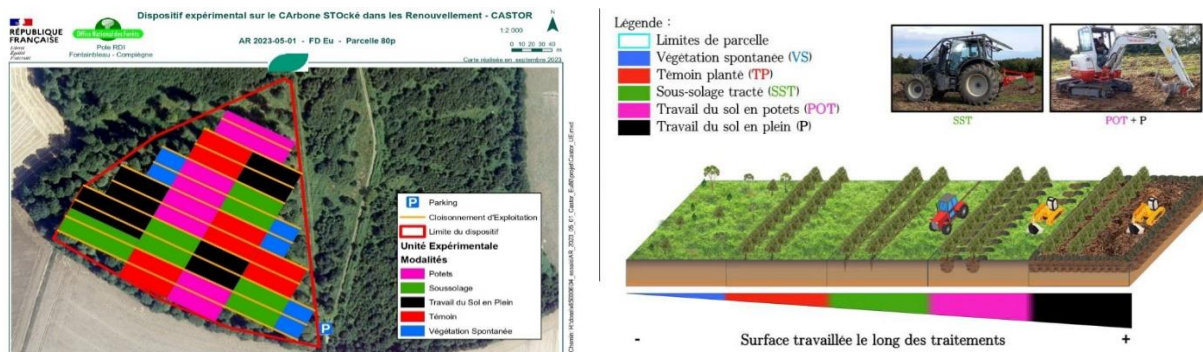


Figure 8

5 modalités :

- Végétation spontanée (VS) : Aucune PMS
- Témoins (TEM) : Aucune PMS, plantation uniquement
- Sous-solage (SST) : Sous-solage tracté en ligne par un tracteur
- Potets (POT) : Potets travaillés à la dent de sous-solage montée sur mini-pelle
- Travail du sol en plein (PLE) : Grands plateaux travaillés à la dent de sous-solage montée sur mini-pelle

Les modalités représentent un gradient d'intensité en termes de surface de sol travaillé.

Différenciation des zones induites par le travail dans la modalité POT, dans la modalité SST et dans la modalité PLE:

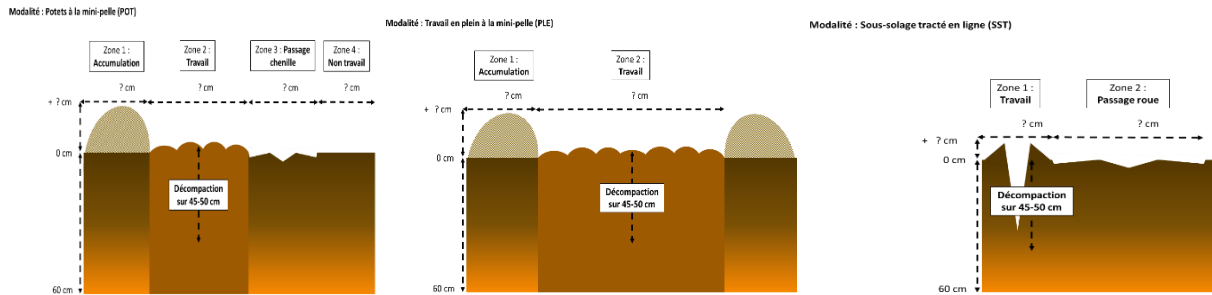


Figure 9

La fin de la mise en place du dispositif a été acté au moment de la fin de la plantation de chêne sessile, qui a eu lieu début février 2024.

## Campagnes d'Échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnages concernées par les stocks de COS et la respiration du sol sont au nombre de trois. Il y a eu une première campagne d'échantillonnage en juillet 2023 avant la phase de broyage du parterre de coupe (nommée T-1), une deuxième campagne après la phase de broyage, juste avant la PMS (nommée T0), et une dernière campagne juste après la PMS (nommée T1).

### Campagnes d'échantillonnage T-1 et T0 et de mesure de la respiration du sol avant PMS

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées avant PMS : campagne T-1 avant broyage léger et campagne T0 après le broyage pour étudier l'effet broyage sur les stocks de COS (Figure 10 et Figure 11). Les échantillons pour la mesure du COS ont été prélevés dans chacune des couches (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm), le sol a été mis dans un sac plastique étiqueté et ramené au laboratoire et stocké en chambre froide.

Les prélèvements pour la mesure de la densité apparente ont été réalisés en utilisant la méthode des cylindres (sur les mêmes couches de sol que précédemment), c'est-à-dire en enfonçant un cylindre en métal (de 100cm<sup>3</sup>) verticalement au centre de chaque couche échantillonnée, en ayant au préalable dégagé la couche supérieure pour pouvoir positionner le cylindre. Les échantillons de densité apparente ont été également mis dans des sacs plastiques et ramenés au laboratoire.



Figure 10. Campagne T-1



Figure 11. Campagne T0

La respiration du sol sur le dispositif expérimental *in situ* a été réalisée sur 60 points à T-1 et sur 60 points à T0. La mesure consiste à couper la végétation et à mettre le sol à nu sur une surface suffisante pour positionner la chambre de mesure du respiromètre de terrain (figure 12). La sonde de mesure de la température et de l'humidité est plantée juste à côté de la chambre pour avoir les données les plus proches de la mesure de respiration du sol. La mesure avec le respiromètre dure 2min, cette durée peut être adaptée en fonction du type de sol et de la respiration du sol en question.



Figure 12. Respiromètre de terrain EGM-5

### Campagne d'échantillonnage après PMS

Il y a eu une campagne d'échantillonnage après PMS (T1), Les échantillons pour la mesure du COS ont été prélevés dans les mêmes couches (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm) dans les modalités TEM, POT, SST et PLE (figure 13), ils ont été aussi mis dans un sac plastique étiqueté et ramenés au laboratoire et stocké en chambre froide. La modalité VS n'a pas été échantillonnée, car elle est considérée comme similaire à la modalité TEM, cela permet de réduire le nombre d'échantillon à prélever. Pour les modalités de PMS, dans les zones de sol travaillée (ligne de sous-solage, potet et travail en plein), une couche de sol plus profonde (60-70 cm) a été échantillonné en plus. En effet, les stocks de COS sont comparés à masse équivalente de sol, il est donc nécessaire de prélever davantage de sol dans les zones décompactés. Les prélèvements pour la mesure de la densité apparente ont aussi été réalisé en utilisant la méthode des cylindres.

La respiration du sol sur le dispositif expérimental *in situ* a été réalisé dans chacune des zones induites par les outils de PMS sur 108 points (48 POT + 24 SST + 24 PLE + 12 TEM) à T1 (figure 14 (points jaunes)). Le nombre de mesure de respiration du sol est supérieur aux campagnes précédentes car il a fallu prendre en compte l'hétérogénéité induite.



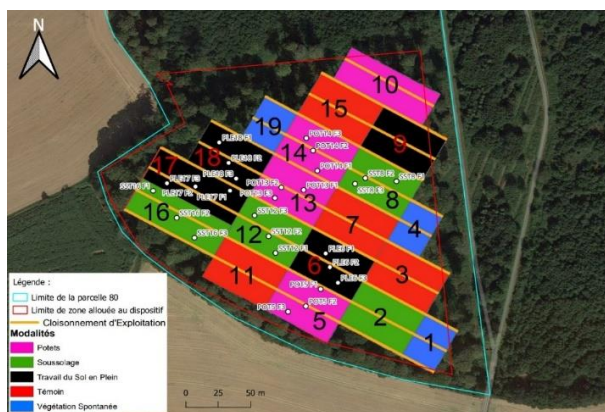


Figure 13. Schéma du dispositif avec numérotation des UE et position des fosses pour l'échantillonnage (T1)



Figure 14. Schéma du dispositif avec (carrés jaunes) les emplacements (3 répétitions d'emplacements par UE) de mesures de respiration du sol, 4 zones par emplacement dans POT ; 2 dans SST ; 2 dans PLE ; 1 dans TEM.

## Description du traitement des échantillons pour le COS :

Pour évaluer les stocks de carbone organique du sol (COS), nous utilisons la formule suivante (FAO, 2020):

$$\text{Stock de COS (MgC.ha-1)} = \text{COS (mgC.g-1)} \times \text{Da (g.cm-3)} \times (1 - \text{EG (cm}^3\text{.cm-3)}) \times \text{épaisseur (cm)} \times 0,1$$

Les valeurs nécessaires pour chaque paramètre sont obtenues à partir des préparations suivantes : tamisage, séchage, broyage. Les échantillons destinés à la mesure du COS sont tamisés frais à 5mm pour enlever les grosses particules, racines et débris organiques, mis à séché à l'air ou à 40°C (Baize, 2000) pour ensuite être tamisé à 2 mm, pour réaliser les analyses sur la terre fine. Ensuite les échantillons sont broyés à l'aide d'un broyeur à billes (RETSCH MM400) pour obtenir une poudre fine et homogène.

Ensuite, le carbone total est mesuré en utilisant un analyseur élémentaire CHN (Thermo Scientific, Flash 2000, NC Soil Analyzer). Environ 30-40 mg de sol broyé sont pesés avec une balance à précision et placés dans des capsules en étain. Les capsules sont introduites dans l'analyseur élémentaire CHN où elles sont brûlées à haute température. Le dispositif mesure les gaz produits et détermine la teneur en carbone total.

Pour déterminer la densité apparente les échantillons sont séchés à 105°C pendant 24 heures. L'échantillon est ensuite pesé et tamisé à l'eau sur un tamis de 2mm pour éliminer le sol et récupérer les racines et les cailloux. Les racines et les cailloux sont ensuite séchés à 105°C puis pesés et enfin leur volume est déterminé par déplacement d'eau dans des éprouvettes graduées. Une fois les mesures faites, les racines et cailloux sont jetés à la poubelle. La densité apparente est calculée par la formule:

$$Da \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} = \text{Masse de sol sec (g)} / \text{Volume du cylindre (cm}^3\text{)}$$

Concernant les échantillons de litières qui participent aux stocks de COS, ils sont mis à sécher à l'air avec les autres échantillons de sols, ils sont ensuite broyés au Culatti puis au broyeur à bille pour ensuite être analysés à l'analyseur élémentaire CHN.

### Traitement, mise en forme et analyses statistiques des données

Les données ont été traitées avec le logiciel Excel (Excel 2016) en vue de l'analyse statistique sous R (R 3.5.3).

## Résultats et discussion

L'étude visait à évaluer comment différentes méthodes de PMS affectent les stocks de COS avant et après PMS. Au moment de la remise du rapport, les résultats portent uniquement sur les stocks de COS avant la PMS, présentés dans le graphique ci-dessous (Figure 15). Ce graphique montre la répartition des stocks moyens en COS à différentes profondeurs pour la campagne T-1 (Tableau 2).



Figure 15

Tableau 2

prof_1	mean_stock	sd_stock
1 0-5	21.343430	10.668183
2 10-20	22.263515	16.580361
3 20-40	21.323794	20.316002
4 40-60	12.690037	8.587663
5 5-10	17.626990	8.906877
6 Litière	1.124974	0.894698

Les mesures de stocks de COS dans le sol ont montré que sur la parcelle étudiée, la valeur était d'environ 95 Mg C/ha. Selon Pan et al. (2011), la quantité moyenne de carbone organique dans les sols

des forêts de la zone tempérée est d'environ 80 Mg C/ha, on peut en conclure que les stocks de COS sur la parcelle étudiée est conforme au niveau moyen retrouvé dans la littérature.

Les résultats de stocks COS après la PMS peuvent donner une meilleure compréhension de la dynamique et des changements induits par l'intervention des travaux de PMS sur cette parcelle et peut aider à répondre à l'hypothèse que les méthodes de PMS impactent négativement les stocks de COS ainsi que leur redistribution au sein du profil de sol dans les zones travaillées.

En ce qui concerne les résultats concernant le flux de CO<sub>2</sub>, les données ont été obtenues pour la période avant PMS et après PMS. Pour le graphique, les données après PMS ont été divisées en zones et modalités afin d'observer comment les différentes interventions influencent le flux de COS :

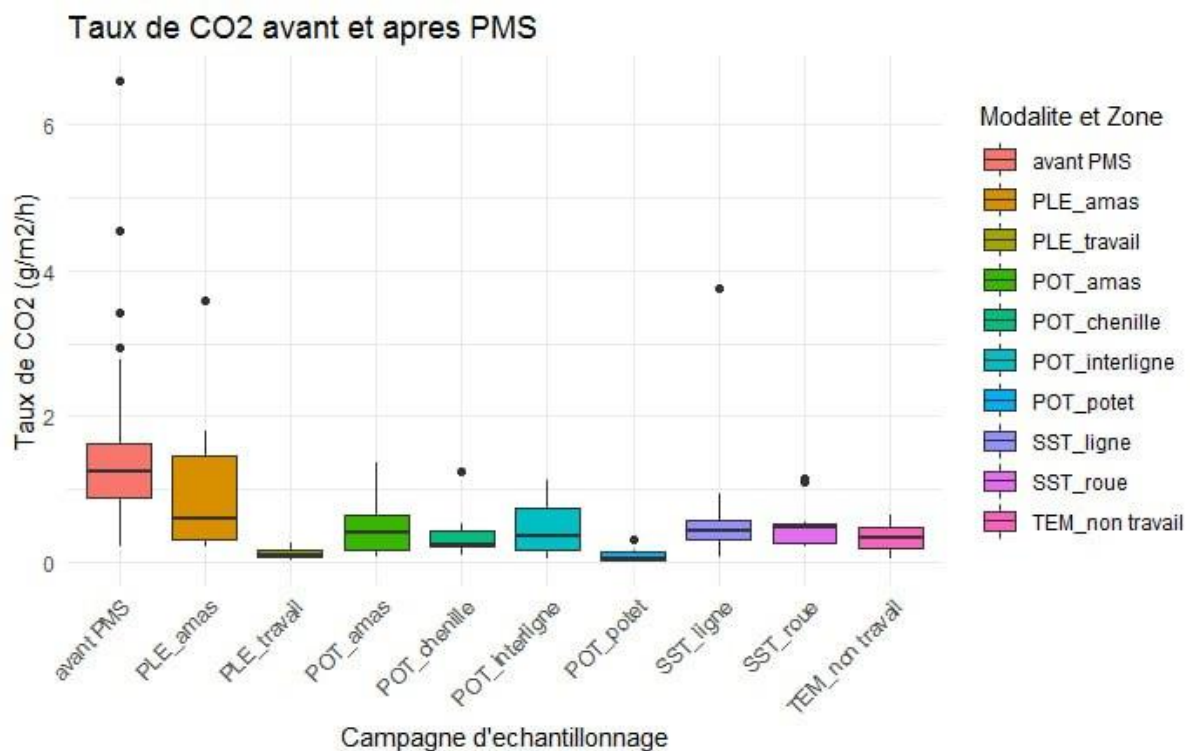


Figure 16

Tableau 3

```

$statistics
  Chisq Df p.chisq
 130.9736 9      0

$parameters
  test p.adjusted name.t ntr alpha
Kruskal-wallis none respiro$group 10 0.05

$groups
  respiro$taux_co2 groups
avant PMS          158.05833 a
PLE_amas           116.50000 b
SST_ligne          83.91667 bc
SST_roue           82.66667 bc
POT_amas           78.37500 c
POT_interligne     71.08333 c
POT_chenille       61.04167 c
TEM_non travail    58.87500 cd
PLE_travail        24.54167 de
POT_potet          17.91667 e
  
```

Un test de Kruskal-Wallis a été réalisé (tableau 3) pour examiner les différences de flux de COS avant et après PMS. Les résultats de l'analyse de Kruskal-Wallis montrent des différences dans les niveaux de taux de CO<sub>2</sub> (niveau de CO<sub>2</sub>) entre les différents groupes (avant PMS et après PMS).

## Conclusion

L'étude a été menée dans le but d'évaluer l'impact de la préparation mécanisée du site (PMS) sur le contenu en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et en carbone organique du sol (COS). Bien que les résultats complets ne soient pas encore disponibles, les données préliminaires fournissent déjà des informations précieuses.

Les résultats préliminaires concernant les stocks de COS avant la mise en œuvre de PMS montrent une répartition claire du contenu en carbone organique du sol en fonction de la profondeur. Il est à noter que la répartition du COS varie significativement avec la profondeur, ce qui met en évidence l'hétérogénéité verticale du stock de carbone dans les sols forestiers.

De plus, les données initiales sur les flux de COS avant et après PMS ont été obtenues. Pour les périodes post-PMS, les données ont été subdivisées en différentes zones et modalités pour évaluer l'impact des différentes pratiques de PMS sur les flux de COS. Ces analyses permettront de déterminer comment chaque pratique influence les émissions de carbone et la séquestration dans les sols.

En l'état actuel de l'étude, les résultats suggèrent que les pratiques de PMS peuvent avoir un impact significatif sur les stocks et flux de C. Cependant, des analyses complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces observations et pour comprendre pleinement les mécanismes sous-jacents. Ces résultats préliminaires indiquent également l'importance de considérer la profondeur du sol et les spécificités locales lors de l'évaluation des impacts de PMS.

Les prochaines étapes de la recherche incluront l'analyse complète des données post-PMS et la comparaison des différentes modalités de PMS. Ces analyses approfondies permettront d'affiner notre compréhension de l'impact de la préparation du site sur les dynamiques du carbone dans les sols forestiers et de formuler des recommandations pour les pratiques de gestion durable des sols forestiers.

Ce rapport d'avancement montre déjà des pistes intéressantes qui seront approfondies dans les étapes ultérieures de l'étude.

## Bibliographie

- Balesdent, Jérôme, Isabelle Basile-Doelsch, Joël Chadoeuf, Sophie Cornu, Delphine Derrien, Zuzana Fekiacova, et Christine Hatté. « Atmosphere–Soil Carbon Transfer as a Function of Soil Depth ». *Nature* 559, n° 7715 (juillet 2018): 599-602. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>.
- Basile-Doelsch, Isabelle, Jérôme Balesdent, et Sylvain Pellerin. « Reviews and Syntheses: The Mechanisms Underlying Carbon Storage in Soil ». *Biogeosciences* 17, n° 21 (30 octobre 2020): 5223-42. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020>.
- Chenu, Claire, Jean-Luc Chotte, et Paul Luu. « Le stockage du carbone dans les sols ». *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* N° 105, n° 1 (12 janvier 2022): 72-77. <https://doi.org/10.3917/re1.105.0072>.
- Dassot, Mathieu, et Catherine Collet. « Effects of Different Site Preparation Methods on the Root Development of Planted Quercus Petraea and Pinus Nigra ». *New Forests* 52, n° 1 (janvier 2021): 17-30. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09781-7>.
- Derrien, D, M-F Dignac, I Basile-Doelsch, S Barot, L Cécillon, C Chenu, T Chevallier, et al. « Stocker du C dans les sols ». *Etude et Gestion des Sols*, 2016.
- Jandl, Robert, Marcus Lindner, Lars Vesterdal, Bram Bauwens, Rainer Baritz, Frank Hagedorn, Dale W. Johnson, Kari Minkinen, et Kenneth A. Byrne. « How Strongly Can Forest Management Influence Soil Carbon Sequestration? ». *Geoderma* 137, n° 3-4 (janvier 2007): 253-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.
- Jonard, Mathieu, Manuel Nicolas, David A. Coomes, Isabelle Caignet, Anaïs Saenger, et Quentin Ponette. « Forest Soils in France Are Sequestering Substantial Amounts of Carbon ». *Science of The Total Environment* 574 (janvier 2017): 616-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.028>.
- Krueger, Inken, Christoph Schulz, et Werner Borken. « Stocks and Dynamics of Soil Organic Carbon and Coarse Woody Debris in Three Managed and Unmanaged Temperate Forests ». *European Journal of Forest Research* 136, n° 1 (février 2017): 123-37. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-1013-4>.
- Lal, R. « Forest Soils and Carbon Sequestration ». *Forest Ecology and Management* 220, n° 1-3 (décembre 2005): 242-58. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>.
- — —. « Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change ». *Geoderma* 123, n° 1-2 (novembre 2004): 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.
- Lal, Rattan, Wakene Negassa, et Klaus Lorenz. « Carbon Sequestration in Soil ». *Current Opinion in Environmental Sustainability* 15 (août 2015): 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>.
- Lehmann, Johannes, et Markus Kleber. « The Contentious Nature of Soil Organic Matter ». *Nature* 528, n° 7580 (décembre 2015): 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>.
- Macías, Felipe, et Marta Camps Arbustain. « Soil Carbon Sequestration in a Changing Global Environment ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15, n° 6 (août 2010): 511-29. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9231-4>.

- Mallik, A.U., et D. Hu. « Soil Respiration Following Site Preparation Treatments in Boreal Mixedwood Forest ». *Forest Ecology and Management* 97, n° 3 (octobre 1997): 265-75.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00067-4).
- Post, Wilfred M, et P O Box. « ORGANIC CARBON IN SOIL AND THE GLOBAL CARBON CYCLE t », s. d.
- Ryzhova, I. M., M. A. Podvezennaya, V. M. Telesnina, L. G. Bogatyrev, et O. V. Semenyuk. « Assessment of Carbon Stock and CO<sub>2</sub> Production Potential for Soils of Coniferous-Broad-Leaved Forests ». *Почвоведение*, n° 9 (1 septembre 2023): 1143-54. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600713>.
- Schmidt, Michael W. I., Margaret S. Torn, Samuel Abiven, Thorsten Dittmar, Georg Guggenberger, Ivan A. Janssens, Markus Kleber, et al. « Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property ». *Nature* 478, n° 7367 (octobre 2011): 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>.
- Stolbovoy, V. S. « Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia ». *Dokuchaev Soil Bulletin*, n° 111 (25 septembre 2022): 5-29. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-5-29>.
- Valery, A, et Marc Pansu. « Dynamique des matières organiques des sols, modèles proposés et relations modèles-organismes ». *Etude et Gestion des Sols*, 2022.