

Rapport de stage

Caractérisation écologique d'un dispositif expérimental en Forêt
d'Eu (76, Normandie) avant et après broyage du parterre de coupe
afin de préparer le site pour la plantation en vue d'un
renouvellement forestier

Licence 3 Ecologie et Biologie des Organismes

Stage prévu du 13 mai au 5 juillet 2024

Stagiaires : Pascaline Lemesle- -Grieu, Dorine Hurel, Tatiana Daccour

Université de Rouen Normandie 2023-2024

Laboratoire : ECODIV EA 1499 / USC – RUN – INRAe

Encadrant : Lucas Poullard, doctorant ECODIV

Tuteur universitaire: Vincent Moulin, doctorant ECODIV

Rapport de stage

Caractérisation écologique d'un dispositif expérimental en Forêt d'Eu (76, Normandie) avant et après broyage du parterre de coupe afin de préparer le site pour la plantation en vue d'un renouvellement forestier



Photographie au drone réalisée par le laboratoire BEF

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre encadrant Lucas Poullard, pour son accompagnement tout au long du stage et sa disponibilité pour répondre à nos interrogations ainsi que ses nombreuses relectures. Ses explications nous ont permis d'être rapidement autonomes pour nos manipulations au laboratoire. Nous le remercions aussi pour la confiance qu'il nous a accordé, sa gentillesse et sa bienveillance.

Nous remercions aussi Fabrice Bureau qui nous a permis de faire ce stage ainsi que pour ses conseils avisés et son amabilité.

Nous pensons également à Pierre Simonot que nous remercions pour sa gentillesse, sa bienveillance et son aide pour les manipulations au CHN.

Merci à Aurélie Husté pour sa disponibilité et sa précieuse aide pour la réalisation de nos cartes sur QGIS.

Un grand merci à toute l'équipe du laboratoire pour leur accueil, leur bienveillance et leur aide pour les manipulations, nous pensons notamment à Evelyne Blanchard, Sylvaine Buquet et Philippe Delporte.

Aussi, nous remercions Vincent Moulin pour ses retours rapides et pertinents.

Enfin, nous souhaitons remercier Estelle Langlois pour son accueil au sein du laboratoire ECODIV.

Sommaire

Introduction.....	1
Contexte général.....	1
Objectifs du stage.....	3
Démarche adoptée.....	4
Matériel et méthodes.....	5
Site d'étude.....	5
Dispositif expérimental.....	7
Stratégies d'échantillonnages.....	8
Échantillonnage avant broyage (T-1).....	8
Biomasse racinaire.....	8
Biomasse aérienne.....	10
Rémanents forestiers.....	10
Échantillonnage après broyage (T0).....	13
Traitement des échantillons au laboratoire.....	15
Biomasse racinaire.....	15
Biomasse aérienne.....	18
Rémanents forestiers.....	18
Traitement et analyses des données.....	19
Résultats.....	20
Caractérisation initiale du site.....	20
Estimation de l'effet du broyage.....	22
Discussion.....	27
Conclusion et perspectives.....	32
Bilan du stage.....	34
Bibliographie.....	36
Webographie.....	38
Annexes.....	39

Présentation de la structure d'accueil

Situé à Mont-Saint-Aignan, le laboratoire ECODIV EA 1499 / USC – RUN – INRAe (Étude et COmpréhension de la bioDIVERSité) a été créé sous sa dénomination actuelle en 1997 par Monsieur Didier Alard qui l'a dirigé jusqu'en 2004. La direction a ensuite été assurée de septembre 2004 à septembre 2006 par Monsieur Fabrice Bureau et Madame Estelle Langlois. De septembre 2006 à décembre 2013 c'est Monsieur Thibaud Decaëns qui a dirigé le laboratoire puis à partir de 2014, la direction a été assurée par Michaël Aubert. En 2021 Mme Estelle Langlois en a pris la direction.

ECODIV est un laboratoire de recherche en écologie qui assure une double mission de Recherche et d'Enseignement et collabore avec l'INRAE. Il dispose d'une superficie de 1600m² dont une partie partagée avec le laboratoire M2C (Morphodynamique Continentale et Côtière).

Côté recherche, l'équipe du laboratoire (*Fig. 1*) est spécialisée sur les relations biologie-fonctionnement à l'interface sol-végétation des écosystèmes terrestres. Plus particulièrement, l'équipe se focalise sur les mécanismes d'assemblages des espèces ainsi que sur la dynamique des populations et communautés au sein des compartiments aérien et souterrain et sur la dynamique de la matière organique. Les études menées par le laboratoire en collaboration avec ses partenaires permettent de participer à la mise en place de stratégies de gestion afin de répondre aux enjeux d'adaptation des écosystèmes aux changements globaux.

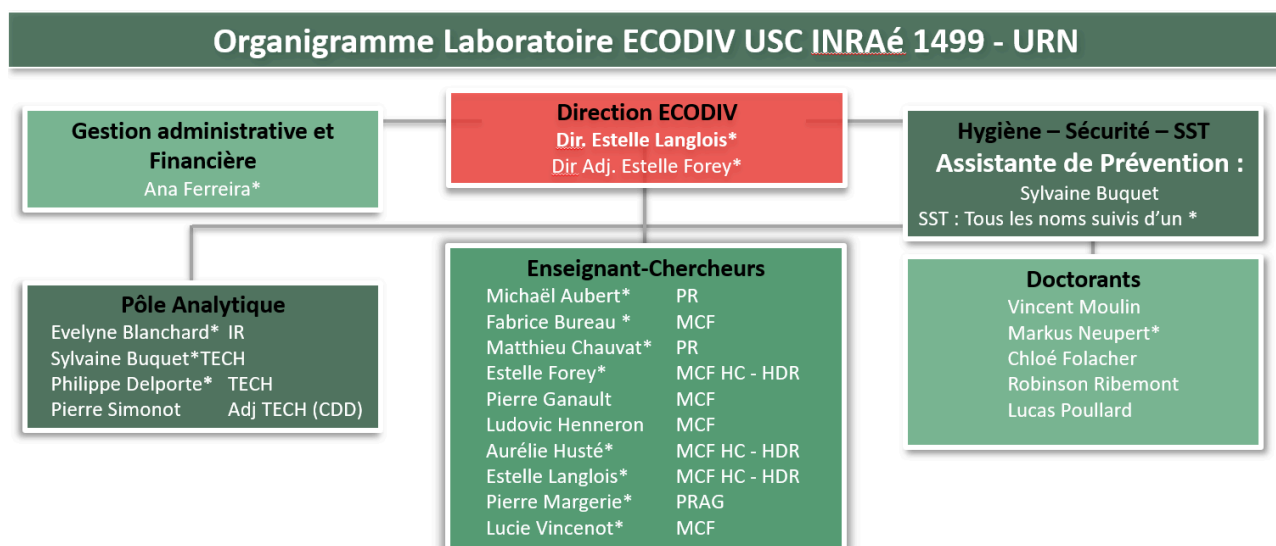


Fig. 1 Organigramme du laboratoire ECODIV.

Pour pouvoir réaliser ses recherches, le laboratoire ECODIV héberge le plateau d'analyses chimiques des matrices environnementales de la plateforme PRESEN (Plateforme de Recherche en Science de l'Environnement Normande).

Côté enseignement, la majorité est dispensée au sein du département de Biologie de l'UFR des Sciences et Techniques dans la filière Licence 3 Ecologie et Biologie des Organismes ainsi que dans le Master Gestion de l'Environnement et le Master MEEF (Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation). La plupart des enseignements assurés concernent l'écologie théorique, notamment l'écologie des populations, des communautés et des écosystèmes, de terrain, appliquée, mais aussi la botanique, l'entomologie, la pédologie ou encore les statistiques appliquées à la biologie.

Introduction

Contexte général

Une forêt est un écosystème complexe, dont la structure est définie par le biotope, c'est-à-dire le milieu physique et la biocénose correspondant à l'assemblage des espèces vivantes que l'on peut y trouver. Un écosystème forestier est qualifié d'écosystème puisqu'il s'agit d'un ensemble d'interactions entre les diverses espèces présentes, c'est-à-dire animaux, plantes et microorganismes avec leur environnement non vivant. Les interactions au sein des écosystèmes forestiers sont interdépendantes (Lévêque et Mounolou 2001).

Les forêts agissent comme des réservoirs de biodiversité, abritant une multitude d'espèces végétales et animales, dont certaines sont uniques à leur propre écosystème. Elles fournissent par ailleurs de nombreux services écosystémiques tels que la purification de l'air et de l'eau, la protection du sol contre l'érosion et la fourniture de ressources naturelles tel que le bois (European Environment Agency, 2016). Elles jouent également un rôle crucial dans la régulation du climat, absorbant le dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère et libérant l'oxygène par le biais de la photosynthèse. Chaque année, les forêts absorbent environ 30 % des émissions anthropiques mondiales de CO_2 (Magnússon et al., 2016). En stockant le carbone dans leur biomasse et dans le sol, les forêts agissent comme des puits de carbone, retirant activement le CO_2 de l'atmosphère. Cependant, cette capacité de séquestration du carbone des écosystèmes forestiers subit de nombreuses menaces, telles que la déforestation, la fragmentation des habitats, la pollution et le changement climatique (Lal 2005). Ces pressions anthropiques ont des répercussions graves sur la santé et la stabilité des écosystèmes forestiers, mettant en péril la diversité biologique et les services qu'ils fournissent. Ainsi, la conservation et la gestion durable des forêts sont essentielles pour préserver leur intégrité écologique et assurer leur contribution continue au bien-être humain et à la santé de la planète (Biro et al, 1996).

La gestion forestière ou sylvicole repose sur une diversité de méthodes adaptées aux caractéristiques spécifiques de chaque forêt telles que la structure du peuplement

(répartition des arbres par âges ou diamètres), le mode de renouvellement (naturel ou artificiel), la nature du sol (type de sol) ou les conditions pédoclimatiques. Différentes techniques sont appliquées aux parcelles forestières en fonction des choix de gestion. Par exemple, le broyage du parterre de coupe fait partie des travaux de préparations mécanisées du site (PMS) mais aussi de l'entretien de la parcelle. Il permet de fragmenter la biomasse aérienne pouvant se développer de façon importante après une coupe d'exploitation d'un peuplement. Le broyage permet également une fragmentation des rémanents forestiers qui sont des morceaux de bois sans valeur économique, des branches et des brindilles laissés volontairement au sol après une coupe (Office National des Forêts, "Les rémanents ces branches laissées au sol après une coupe en forêt"). Le broyage permet ainsi de nettoyer les parcelles tout en gardant les fragments obtenus et donc la matière organique sur le site.

Laisser ces éléments au sol est bénéfique pour la fertilité des sols car ils libèrent des nutriments lors de leur décomposition (Achat et al, 2015). De plus, ils favorisent la biodiversité en offrant des habitats pour diverses espèces et aident à prévenir l'érosion du sol.

Les rémanents forestiers sont notamment une source importante de matière organique dans les sols forestiers et leur décomposition contribue à la libération de carbone dans l'atmosphère et les sols (Krueger et al., 2017). Le broyage de ces rémanents forestiers avant le renouvellement d'un peuplement est une pratique courante de préparation du site afin de faciliter les conditions de plantation (Collet et al., 2018 ; Pellerin et al., 2020).

Des études ont montré que le broyage du parterre de coupe peut augmenter la disponibilité de la matière organique piégée dans les rémanents forestiers, stimuler l'activité des micro-organismes et donc libérer davantage de CO₂ dans l'atmosphère (Collet et al., 2018 ; Magnússon et al., 2016 ; Pellerin et al., 2020). La littérature suggère que le broyage des rémanents peut également augmenter la quantité de carbone entrant dans le compartiment du sol et favoriser la séquestration du carbone (Magnússon et al., 2016 ; Pellerin et al., 2020).

Le projet CASTOR (comportement du CARbone STOcké dans les sols lors de la Reconstitution des peuplements forestiers par plantation avec préparation mécanisée du site) porté par l'ONF et l'INRAE s'inscrit dans le but de comprendre et d'améliorer les pratiques sylvicoles (<https://renfor.hub.inrae.fr/projets/castor>; INRAE). Une partie de ce

projet consiste à installer un dispositif expérimental en forêt et à mesurer l'effet de différentes méthodes de PMS sur le sol. Cela nécessite une caractérisation précise de la parcelle avant toute intervention. Une bonne caractérisation est essentielle pour assimiler les conditions initiales du site et pour mesurer avec précision les impacts des pratiques de gestion appliquées. Cette étape préparatoire est importante pour assurer la fiabilité des résultats des études forestières.

Le stage porte sur ces aspects de caractérisation de la parcelle et notamment lors de la phase du broyage du parterre de coupe. Il prend la suite du stage de Loui Clément, un ancien stagiaire de M1 au Laboratoire ECODIV qui a participé à la mise en place d'un protocole d'échantillonnage et de traitement d'échantillons au laboratoire permettant de mesurer l'effet du broyage du parterre de coupe. Il a également contribué à l'élaboration d'un protocole visant à quantifier le carbone organique au sol après broyage léger en plein du parterre de coupe.

Objectifs du stage

Ce stage permet de participer activement à la caractérisation initiale du dispositif expérimental de la forêt d'Eu. L'objectif du stage est de déterminer l'effet du broyage du parterre de coupe sur les entrées de carbone d'origine végétale dans le sol.

Dans un premier temps, il s'agit de préparer les échantillons de plantes, de sol et de rémanents forestiers déjà récoltés de la forêt d'Eu, pour en déterminer la biomasse et la teneur en carbone.

Dans un second temps, les résultats d'analyses permettent de cartographier la répartition de la biomasse racinaire avant et après broyage du parterre de coupe. Des cartes de répartition de biomasse aérienne herbacée et de rémanents avant broyage du parterre de coupe ainsi que des cartes de répartition des stocks de carbone pour chaque compartiment sont également réalisées.

Pour finir, l'interprétation des résultats permet de répondre aux hypothèses soumises :

- (1) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone pour le compartiment aérien.
- (2) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone pour le compartiment des rémanents.
- (3) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone pour le compartiment racinaire.
- (4) Le broyage n'a pas d'effet sur les biomasses ni sur les stocks de carbone des différents compartiments végétaux.

Le rapport se structure de la manière suivante : une première partie matériels et méthodes décrivant les stratégies d'échantillonnages et de traitements en laboratoire, la partie suivante portant sur les résultats, et pour finir, une partie discutant des résultats en regard de la littérature.

Le stage se poursuit après le rendu du rapport et la soutenance, le traitement de nouveaux échantillons sera donc poursuivi afin de compléter les données actuelles. Ces nouveaux échantillons constituent notamment des échantillons de broyats prélevés après le broyage du parterre de coupe, permettant de quantifier les biomasses aériennes herbacées et les rémanents broyés. Les résultats dans ce rapport se concentrent donc, pour la partie avant broyage, sur les biomasses aériennes herbacées, racinaires et les rémanents forestiers, pour la partie après broyage, sur les biomasses racinaires.

Démarche adoptée

Pour caractériser le site et répondre aux hypothèses, une analyse des échantillons de rémanents, de biomasses aériennes herbacées et racinaires prélevés dans la parcelle 80 de la forêt d'Eu est réalisée. Ces échantillons sont séchés, pesés, tamisés, pré-broyés et broyés pour quantifier la biomasse et la teneur en carbone grâce à l'analyseur élémentaire CHN. Les données recueillies permettent de réaliser une cartographie des

biomasses et des stocks de carbone des différents compartiments sous logiciel SIG (QGIS) et d'évaluer leur dynamique sur le logiciel R. Les résultats sont ensuite discutés et comparés à la littérature.

Le début de la caractérisation initiale du site, les méthodes d'échantillonnages et de traitement des échantillons mis en place ainsi que les résultats obtenus ont permis la rédaction de ce rapport.

Matériel et méthodes

Site d'étude

Les membres du projet CASTOR se sont mis d'accord sur un nombre de critères à respecter pour le choix du site accueillant le dispositif expérimental (*Tab. 1*).

Tab. 1 Critères de choix du site.

Localisation	Nord-Ouest de la France, périmètre d'1h/1h30 de Rouen
Type de forêt	Publique à antécédent feuillus
Texture du sol	Équilibrée à dominante limoneuse
Charge en éléments grossiers	Pas d'éléments grossiers sur 60 cm
Rétention d'eau	Pas d'engorgement sur 50 - 60 cm
Espèces nuisibles	Pas de hannetons et pas de scolytes
Surface minimale	3 à 4 hectares

Pour correspondre à ces critères, la zone retenue est la parcelle n°80 de la forêt domaniale indivise d'Eu en Seine-Maritime (76) située entre Le Tréport et Neufchâtel-en-Bray, à environ une heure de route d'ECODIV (*Fig 2*). La surface disponible est de 4,8 hectares dont 4,5 hectares dédiés au dispositif expérimental (*Fig. 2*). Il s'agit d'une parcelle à texture limoneuse équilibrée où l'on trouve 50 à 60 cm de limon à silex (néoluvisol) sur de l'argile à silex avec une charge en silex faible à moyenne (*Tab. 2*). En 2016, la parcelle a fait l'objet de travaux de préparation du sol en vue d'une tentative de

mise en régénération naturelle en hêtre. Ces travaux de préparation du sol correspondent à un peignage de la végétation accompagnatrice à l'aide d'un outil de type cultivateur canadien. Cependant, la régénération naturelle a échoué en 2019 à cause de la forte mortalité des plants due à un gel printanier. La parcelle était donc prévue à la plantation par les gestionnaires forestiers, pour mettre en place plus rapidement le peuplement et en profiter pour réaliser une substitution d'essence (hêtre vers chêne sessile). La parcelle possède donc bien un antécédent feuillu et la végétation accompagnatrice est constituée de charme, de hêtre, de fougère aigle, de genêt à balais ou encore de jonc. Enfin la parcelle ne possède pas de contraintes liées au gibier et aucun engrillagement n'y est prévu.

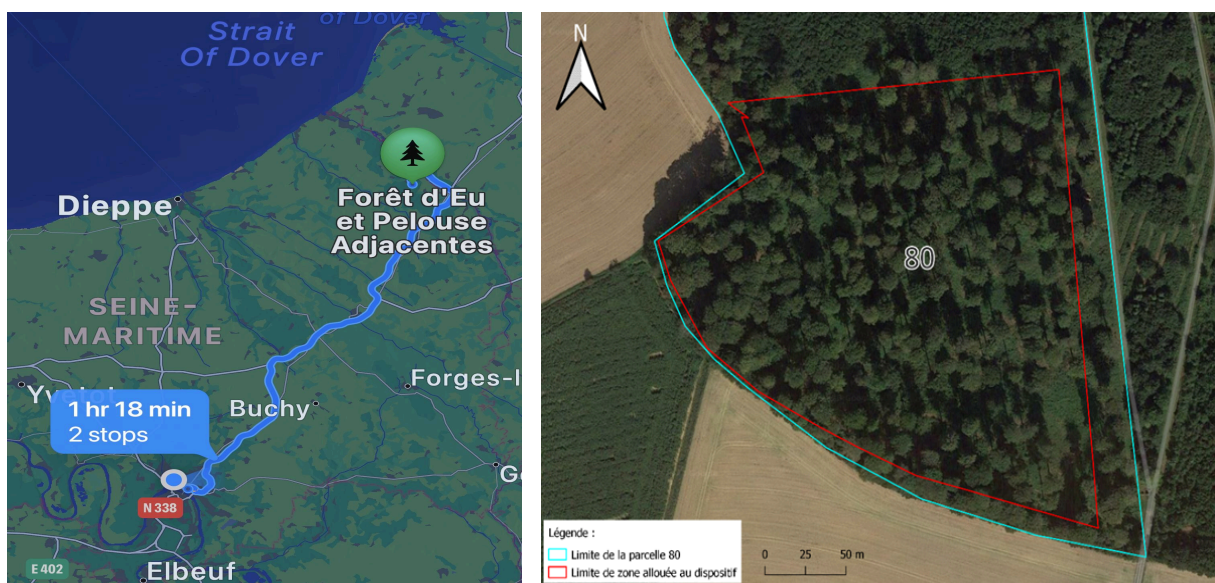


Fig. 2 Distance entre ECODIV et la parcelle n°80 (à gauche) et limites de la parcelle n°80 et de la zone allouée au dispositif.

Tab. 2 Conditions stationnelles du site expérimental de la forêt domaniale indivise d'Eu.

Topographie	Plateau
Température moyenne annuelle	10,1 °C
Pluviométrie	1 200 mm
Roche mère	Craie
Type du sol	Neoluvisol sur argile à silex
Charge en cailloux	Faible à moyenne
Type d'humus	Mull

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été installé en 2023, avec une fin des travaux de PMS en octobre 2023. Les modalités mises en places sont les suivantes :

Tab. 3 Modalités de PMS mises en place.

Végétation spontanée	Aucune PMS
Témoin	Aucune PMS mais seulement plantation
Sous-solage	Sous-solage tracté en ligne par un tracteur
Potets	Potets travaillés à la dent de sous-solage montée sur mini-pelle (Sous-soleur Multifonction®)
Travail du sol en plein	Grands placeaux travaillés à la dent de sous-solage montée sur mini-pelle (Sous-soleur Multifonction®)

Les différentes modalités mises en place au sein des unités expérimentales (UE) possèdent des caractéristiques leur étant spécifiques (Tab. 3). De plus, leur intensité et la surface travaillée augmentent de façon graduelle entre les différentes PMS. La végétation spontanée étant la modalité avec le moins de surface travaillée et le travail du sol en plein celle avec la plus grande surface travaillée (Fig. 3).

Légende :

- Limites de parcelle
- Végétation spontanée (VS)
- Témoin planté (TP)
- Sous-solage tracté (SST)
- Travail du sol en potets (POT)
- Travail du sol en plein (P)



SST



POT + P

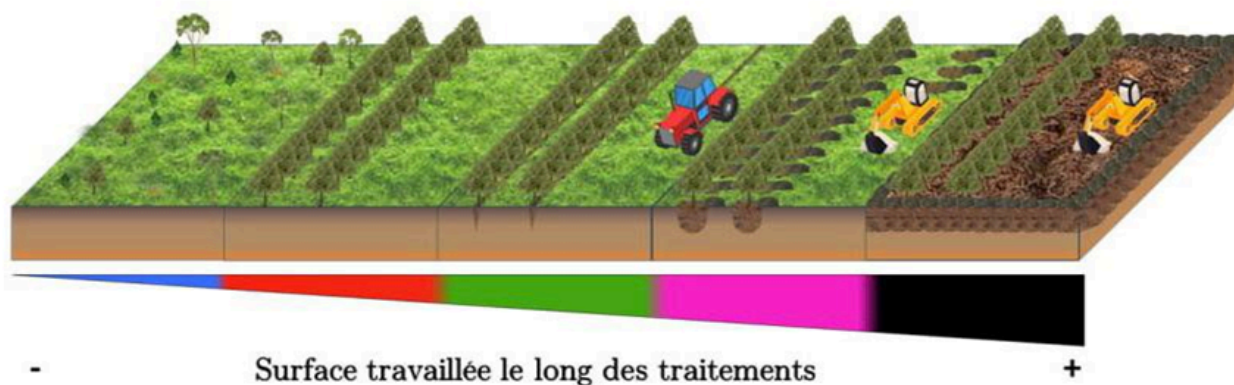


Fig. 3 Schéma représentant l'intensité des différents types de travaux de PMS

Au total, dix-neuf UE ont été positionnées sur le site, soit quatre répétitions de 4 modalités et trois répétitions de la modalité végétation spontanée (Fig. 4). Ces UE représentent en surface 1958,4 m² et 972,2 m², au sein desquelles une zone de prélèvement est délimitée (1102,4m² et 551,2m²). Les petites UE correspondent aux zones de végétation spontanée et les grandes UE correspondent à différentes modalités de préparation mécanisée du site en vue de la régénération forestière.



Fig. 4 Carte des répartitions des modalités sur le site

La mise en place du dispositif et de ses modalités de PMS ont eu lieu après l'étape de broyage du parterre de coupe sur lequel notre stage se concentre.

Stratégies d'échantillonnages

Échantillonnage avant broyage (T-1)

Biomasse racinaire

Après le choix du site, des prélèvements de la biomasse racinaire avant broyage ont été effectués entre le 05 juillet et le 26 juillet 2023. Dans chaque UE, des piquets ont été préalablement plantés, ces piquets ont servi de points de prélèvements pour les différents échantillonnages (Fig. 5). L'échantillonnage de biomasse racinaire est effectué par

carottage sur le site expérimental. La végétation du point de prélèvement a été coupée et retirée avant de carotter le sol avec un cylindre de 15 cm de long et de 8 cm de diamètre. Le matériel utilisé est une tarière racinaire et un maillet pour l'enfoncement de la tarière (Fig. 6). L'échantillonnage a consisté à enfoncer la tarière racinaire par percussion avec le maillet puis à la tourner pour pouvoir désolidariser la carotte du sol et faciliter son extraction. La carotte de sol a ensuite été ensachetée dans un sac plastique préalablement étiqueté avec le numéro du piquet puis stockée en chambre froide au laboratoire.



Fig. 5 Carte des points de prélèvement de la biomasse racinaire à T-1.



Fig. 6 Tarière racinaire et maillet (partie droite de la photo).

Biomasse aérienne

Tout comme la biomasse racinaire, le prélèvement de la biomasse aérienne herbacée a eu lieu entre le 05 juillet et le 26 juillet 2023. Les piquets préalablement plantés sur la parcelle ont également servi de points de prélèvements pour les biomasses aériennes (*Fig. 5*). L'échantillonnage de la biomasse végétale aérienne a nécessité l'utilisation de quadrats de 40 x 40 cm, matérialisés à l'aide de mètre en bois pliants. Toute la biomasse herbacée prélevée a été coupée au ras du sol en faisant attention à ne pas contaminer l'échantillon avec du sol. Le protocole d'échantillonnage englobe du matériel tel que des mètres en bois pliants, des sacs plastiques annotés, des cisailles à gazon et des gants. De la même manière que les échantillons de biomasses racinaires, les échantillons de biomasses aériennes ont été ensachetés dans des sacs plastiques préalablement étiquetés et ramenés au laboratoire.

Rémanents forestiers

Les prélèvements des rémanents forestiers avant broyage (*Fig. 7*) ont été réalisés entre le 06 et le 16 juin 2023. Plusieurs classes de rémanents forestiers avaient été préalablement définies en fonction de leur diamètre : les rémanents forestiers grossiers (Coarse Woody Debris, CWD) et les rémanents forestiers fins (Fine Woody Debris, FWD), ces derniers se subdivisant en rémanents fins moyens (Large Fine Woody Debris, LFWD) et en

rémanents très fins (Very Fine Woody Debris, VFWD) (Korboulewsky, Bilger, and Bessaad 2021).



Fig. 7 Rémanents forestiers sur la parcelle n°80.

L'échantillonnage des rémanents a été réalisé sur 40 points d'échantillonnage sur le dispositif, également selon la position des piquets préalablement plantés (*Fig. 8*). Le mode d'échantillonnage s'est fait par transect de 10 mètres mesuré en déroulant un décamètre. Chaque transect part de l'un de ces piquets dont le choix s'est fait par tirage au sort. L'orientation du transect est obtenue en tirant au sort l'azimut et en prenant comme limite dans le tirage aléatoire les azimuts des limites de l'UE (*Fig. 9*).



Fig. 8 Carte des points de prélèvement des rémanents forestiers à T-1.

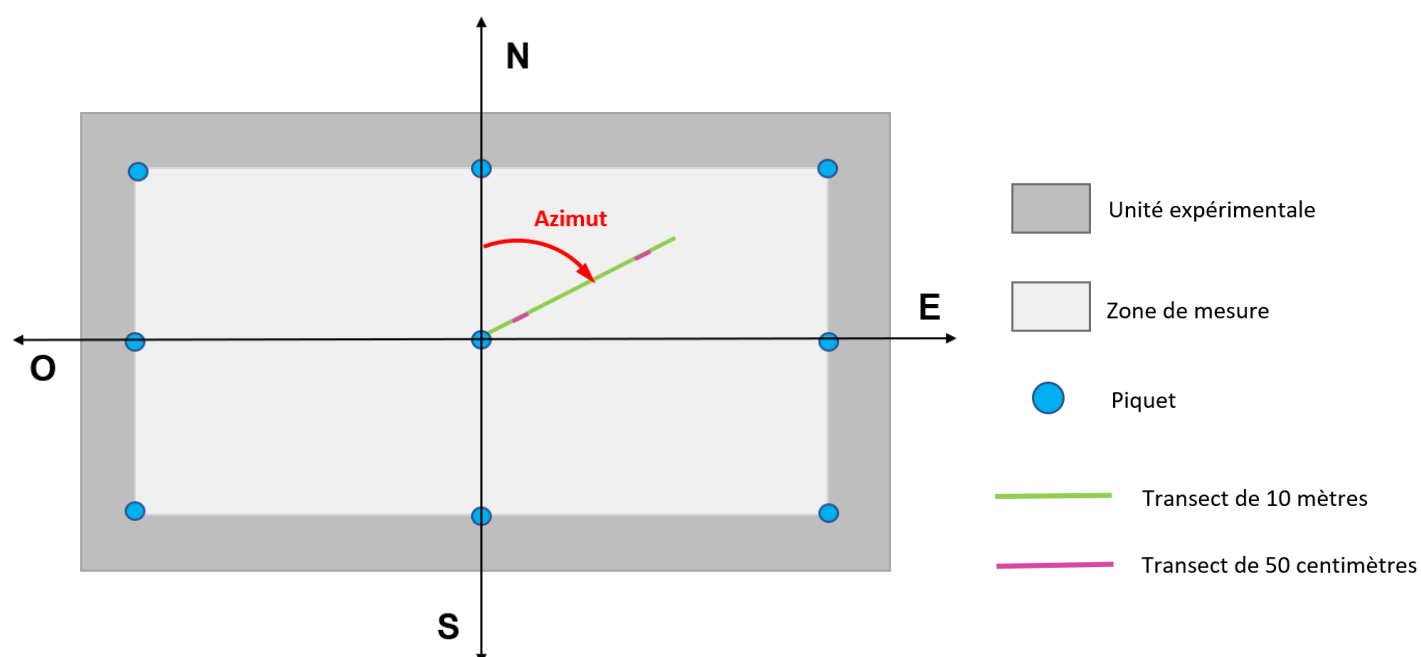


Fig. 9 Schéma du choix de l'orientation des transects.

Sur le transect de 10 mètres, deux tronçons de 50 centimètres écartés d'un mètre des extrémités du transect ont servi à la mesure et l'échantillonnage des rémanents d'un diamètre inférieur à 4 cm (Fig. 9). Sur l'ensemble du transect les rémanents supérieurs à 4

cm de diamètre ont aussi été mesurés. La mesure des diamètres a été réalisée à l'aide d'un mètre pliant, sur chaque section de rémanents coupant le transect. Pour chaque catégorie de taille (*Tab. 4*) dix échantillons ont été ramassés pour déterminer leur masse-volumique et analyser leur teneur en carbone. Les gros rémanents ont été coupés à la scie ou la tronçonneuse pour ne ramener qu'un morceau au laboratoire. Tout comme les échantillons de biomasses racinaires et aériennes, les échantillons de rémanents ont été ensachetés dans des sacs plastiques préalablement étiquetés et ramenés au laboratoire.

Tab. 4 Les différentes classes de rémanents forestiers et leur équivalence dans la nomenclature forestière classique (d'après RÉSOBIO 2015 ; Peyron et al., 2021 et Korboulewsky et al., 2021).

Classe de rémanents		Traduction	Classe de diamètre	Equivalence en nomenclature forestiers
CWD		Rémanents grossiers	$\varnothing > 7 \text{ cm}$	Bois industriel/Bois énergie
FWD	LFWD	Rémanents fins	$4 < \varnothing < 7 \text{ cm}$	Menus bois
	VFWD	Rémanents très fins	$\varnothing < 4 \text{ cm}$	

Échantillonnage après broyage (T0)

Par la suite, un broyage léger de la végétation a eu lieu entre le 22 et le 25 août 2023 à l'aide d'un broyeur de la marque Plaisance de 2,20m de large avec un rotor horizontal muni de marteaux monté sur un tracteur de la marque Valtra, modèle N174 de 180 chevaux (*Fig. 10 et 11*).



Fig. 10 Broyeur de la marque Plaisance avec rotor horizontal muni de marteaux.



Fig. 11 Tracteur de la marque Valtra, modèle N174 de 180 chevaux.

De nouveaux prélèvements de biomasses racinaires ont été réalisés après le broyage du site mais avant les travaux de PMS, le 04 septembre 2023. Cette période correspond à l'état initial noté T0. Le protocole d'échantillonnage de la biomasse racinaire est le même que celui réalisé à T-1 mais sur des points de prélèvements différents (Fig. 12).



Fig.12 Carte des points de prélèvement de la biomasse racinaire à T0.

Traitement des échantillons au laboratoire

Biomasse racinaire

Les carottes sont conservées en chambre froide jusqu'à leur tamisage. Les racines doivent être extraites des carottes de sol. Pour cela ces dernières ont été plongées dans l'eau pendant une période d'environ 24h afin de les ameublir avant de les passer au tamis de 2 mm. Une fois toute la terre retirée par tamisage humide, l'intégralité du tamis est versé dans une bassine d'eau permettant de faire couler les silex encore présents et ainsi récupérer plus facilement les racines. Le surnageant du tamis est récupéré à l'aide d'une petite grille utilisée comme épuisette et ensuite triée à la pince afin de retirer d'éventuels silex, morceaux de bois, vers de terre, parties aériennes de plantes herbacées ou fruits. Certains petits morceaux qui ne sont pas identifiables peuvent être considérés comme des morceaux de racines et sont donc conservés. Les racines sont placées dans des boîtes Labovida avec leur numéro d'échantillon. Ensuite les boîtes contenant les échantillons sont mises au séchage à l'étuve pour 48h à 40°C avec une ventilation modérée pour ne

pas polluer l'ensemble des échantillons avec les morceaux volatiles. La température est fixée à 40°C pour ne pas altérer la teneur en carbone de la biomasse racinaire (Baize, 2000).

Trente échantillons ont été choisis au hasard afin de mesurer le volume des racines par déplacement d'eau à l'aide d'une éprouvette graduée. Les volumes obtenus ont été utilisés afin d'estimer le volume des autres échantillons.

Les échantillons secs sont broyés une première fois au culatti modèle DFH48-Gemini BV et le broyat obtenu est ensuite passé au broyeur à bille pendant 3 minutes à 25 Hz, dans les modèles Retsch MM400 ou MM500 afin d'obtenir une poudre (*Fig. 12 ; Annexe 1 ; Annexe 2*). L'oscillation horizontale provoque des effets d'impact importants pour un traitement efficace des échantillons (Retsch). La poudre obtenue sera utilisée dans l'analyseur CHN (*Fig.13 ; Annexe 3*).

Le CHN est utilisé pour la détermination de la composition en carbone (C) total et en azote (N) total dans des échantillons solides d'origine organique ou minérale. Le matériel nécessaire pour former des boulettes qui passeront au CHN est constitué de deux pinces plates, une spatule, une pince courbée, des capsules en étain ainsi qu'une balance de précision METTLER TOLEDO (max 22 g avec $d = 0,001$ mg) (*Annexe 4*). Cette balance permet de réaliser les pesées nécessaires, et est équipée d'un passeur automatique ainsi que d'un analyseur élémentaire piloté par ordinateur (*Fig.13*). Ensuite entre 4,5 et 5,5 mg de biomasse racinaire réduite en poudre est insérée dans une capsule ce qui correspond à 5 mg avec un pourcentage d'erreurs de 10%. La pesée de 5 mg est liée à la gamme étalon réalisée avec une feuille de chêne qui correspond à la teneur en carbone de la matière végétale. La teneur en carbone est généralement comprise entre 45% et 50% pour ces échantillons. Cette capsule est ensuite pliée pour former une boulette qui sera analysée au CHN.

Après avoir passé les échantillons au CHN, il est nécessaire de mesurer l'humidité résiduelle afin de corriger les résultats du CHN et exprimer les résultats en échantillons sec à 105°C.

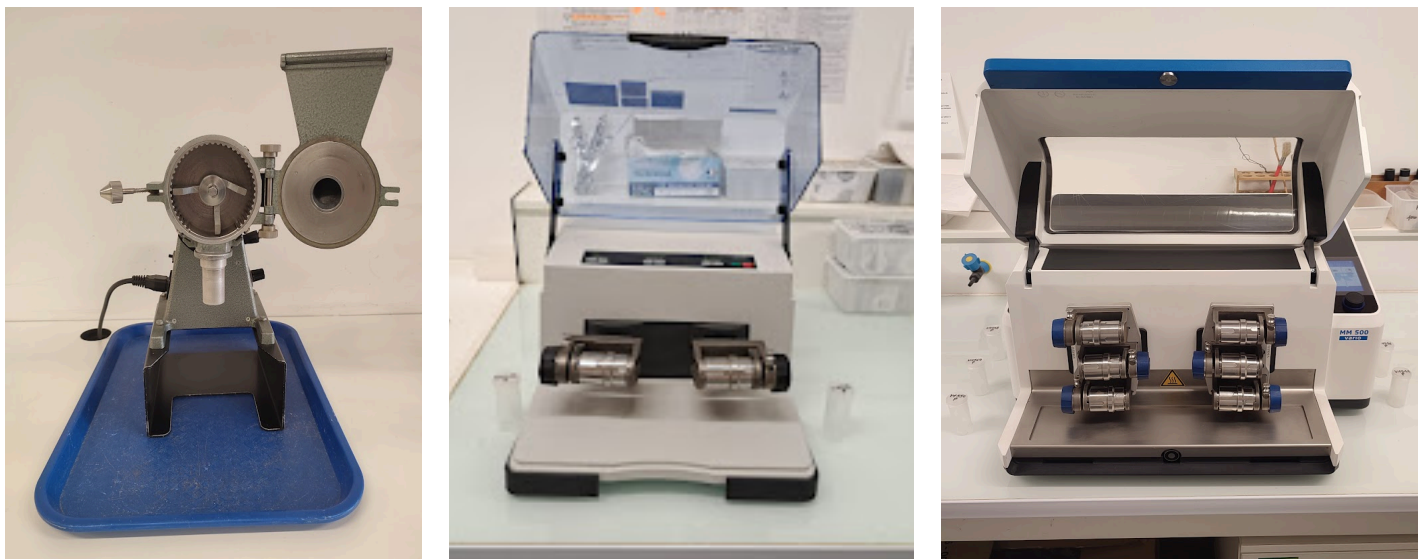


Fig. 13 De gauche à droite : broyeur culatti, broyeur à bille MM400, broyeur à bille MM500.



Fig. 13 De gauche à droite : balance de précision permettant de réaliser les pesées nécessaires avec passeur automatique et analyseur CHN.

Biomasse aérienne

La biomasse aérienne récupérée est placée dans des sachets numérotés et est mise à sécher à 40°C. Les échantillons secs ont été pesés avant d'être découpés aux ciseaux pour être broyés deux fois.

Le premier broyage est réalisé au culatti afin d'obtenir un broyat en petits et fins morceaux. Pour cela, chaque sac contenant la biomasse aérienne est étalé dans un bac et séparé de façon homogène. Un quart du sachet est placé dans le culatti pour être broyé. Les échantillons ayant une trop petite quantité de biomasse ont été quant à eux broyés à plus d'un quart. Le broyat obtenu est placé dans un pilulier avec le numéro d'échantillon associé au numéro du sachet.

La teneur en carbone des échantillons est ensuite analysée au CHN. La préparation des échantillons pour analyse au CHN ainsi que la mesure d'humidité résiduelle se font de la même manière que cité précédemment.

Rémanents forestiers

Les rémanents forestiers sont mis à sécher à l'étuve pour ensuite être pesé sec à 40°C. Leur volume est mesuré par déplacement d'eau de la même manière que pour les biomasses racinaires. Les petits rémanents (<4 cm) sont broyés (au ZM200; *Fig. 14*) et analysés au CHN, tandis que les gros rémanents (>4 cm) n'ayant pu être broyés à l'aide du matériel du laboratoire, la décision a été prise de leur appliquer la teneur en C des petits rémanents pour le calcul des stocks. En effet, les petits et gros rémanents étant certainement issus des mêmes espèces végétales, leur teneur en C doit être similaire.

La préparation des échantillons pour analyse au CHN ainsi que la mesure d'humidité résiduelle se font de la même manière que cité précédemment.

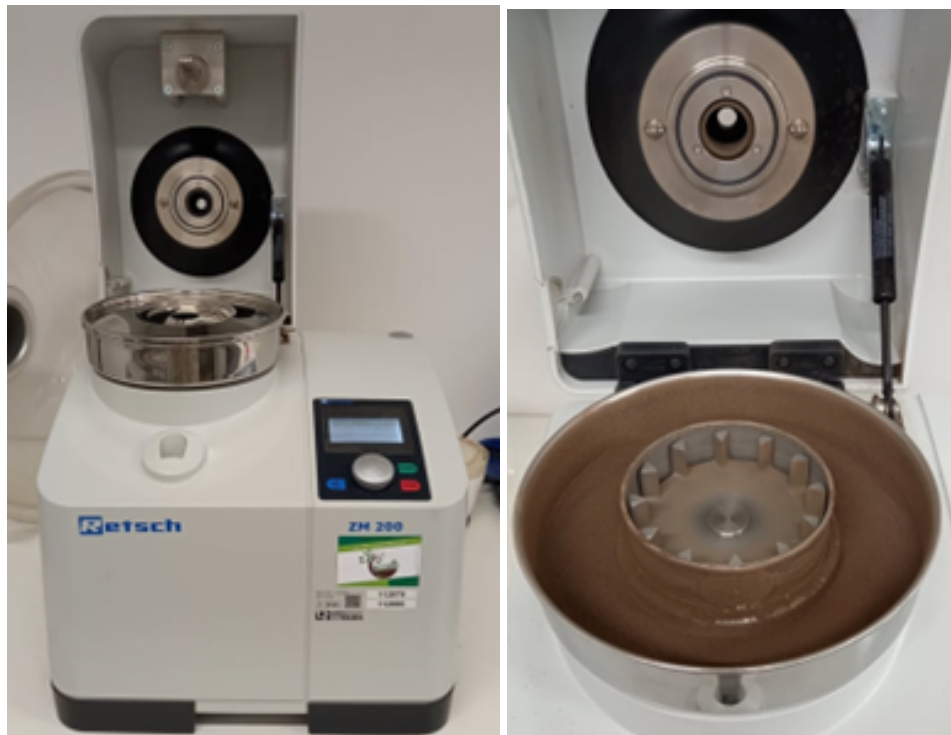


Fig. 14 Broyeur à végétaux Retsch ZM200 (à gauche) et un exemple d'échantillon broyé (à droite).

Traitement et analyses des données

L'ensemble des données ont été intégrées au logiciel Excel de Microsoft Office 2019. Les traitements de ces données ont ensuite permis d'effectuer des analyses statistiques et des représentations graphiques à l'aide du logiciel R Core Team (2023 ; version 4.3.1) (<http://www.r-project.org/>). Les tests statistiques réalisés ont été des tests t de Student pour échantillons appariés puisque les conditions de normalité étaient remplies. Le niveau de significativité des tests statistiques est établi à $\alpha = 0,05$. Des cartes de répartition ont également été produites à l'aide du logiciel QGIS (2024 ; version 3.36.3). Pour ces cartes des interpolations (Inverse Distance Weighted) ont été réalisées. Les paramètres utilisés pour cela sont une taille de cellule de 0,00001 et un coefficient de pondération de 0,001.

Résultats

Les résultats présentés dans cette partie ne sont pas complets, en effet nous obtiendrons le reste des résultats pendant la suite de notre stage, notamment par le traitement et l'analyse des échantillons de broyats prélevés après le broyage du parterre de coupe.

Caractérisation initiale du site

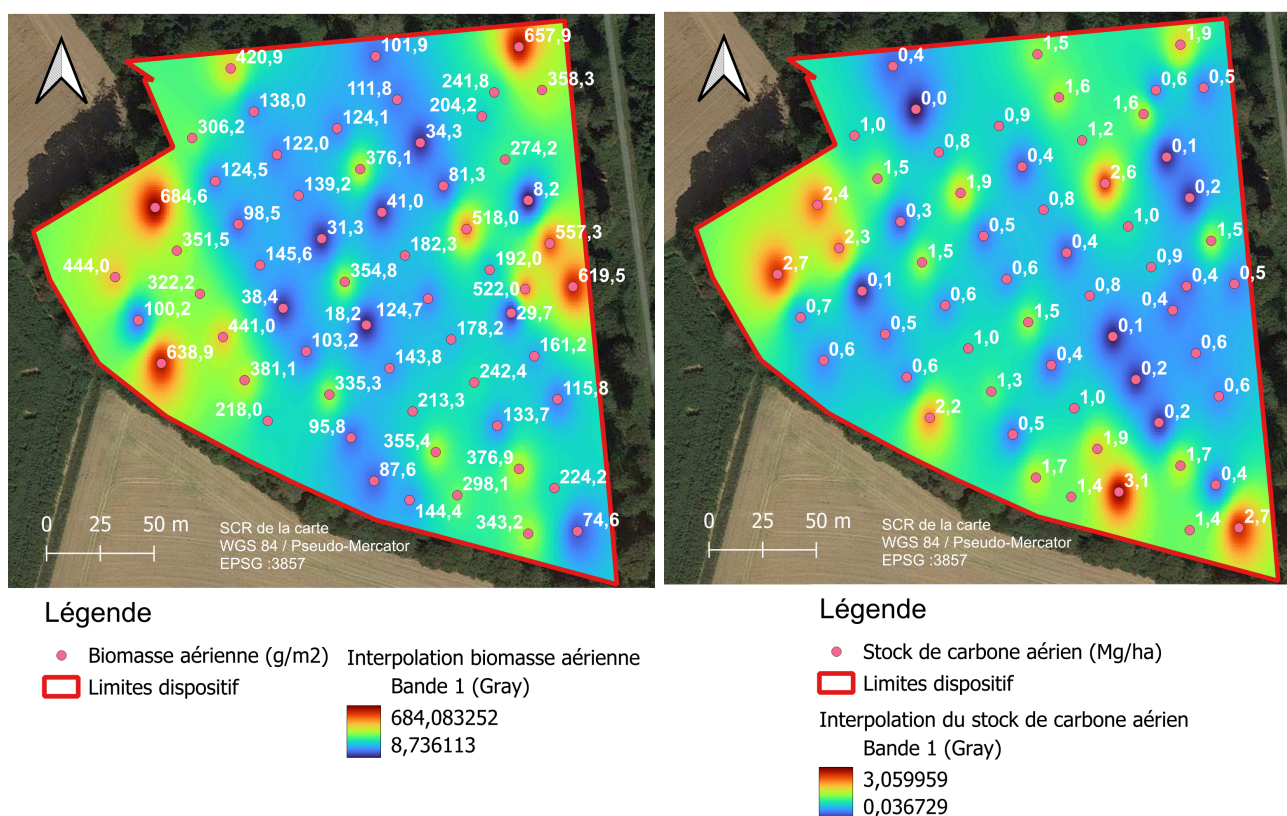


Fig. 15 Carte de répartition de la biomasse aérienne avant broyage (à gauche) et carte de répartition des stocks de carbone dans le compartiment aérien avant broyage (à droite).

La répartition de la biomasse aérienne avant broyage indique des différences dans la répartition des biomasses (Fig. 15). Le bleu correspond aux valeurs de biomasse les plus faibles et le rouge aux valeurs de biomasse les plus fortes. La valeur la plus faible est de 8,2 g/m² et se situe à l'Est et la valeur la plus forte est de 684,6 g/m² et se situe à l'Ouest de la parcelle. Pour la répartition totale sur la parcelle, de fortes valeurs de biomasse se trouvent principalement à l'Ouest, au Nord et à l'Est. Le Sud de la parcelle contient des valeurs de biomasses moyennes et le centre des valeurs faibles.

La répartition des stocks de carbone du compartiment aérien avant broyage indique également des différences dans la répartition avec en bleu les valeurs de stock les plus faibles et en rouge les valeurs les plus fortes (Fig. 15). La valeur de stock de carbone la plus faible est de 0,03 Mg/ha (la carte présente une valeur minimale de 0 Mg/ha correspondant à l'arrondi de la valeur 0,03 Mg/ha) et est située au Nord de la parcelle alors que la valeur la plus élevée est de 3,1 Mg/ha et est située au Sud. La répartition globale de la parcelle indique que les valeurs les plus fortes se situent à l'Ouest et au Sud de la parcelle. Quelques valeurs intermédiaires se trouvent au centre, au Nord et à l'Est de la parcelle, cependant la plus grande partie de ces zones est caractérisée par des valeurs de stock de carbone faible.

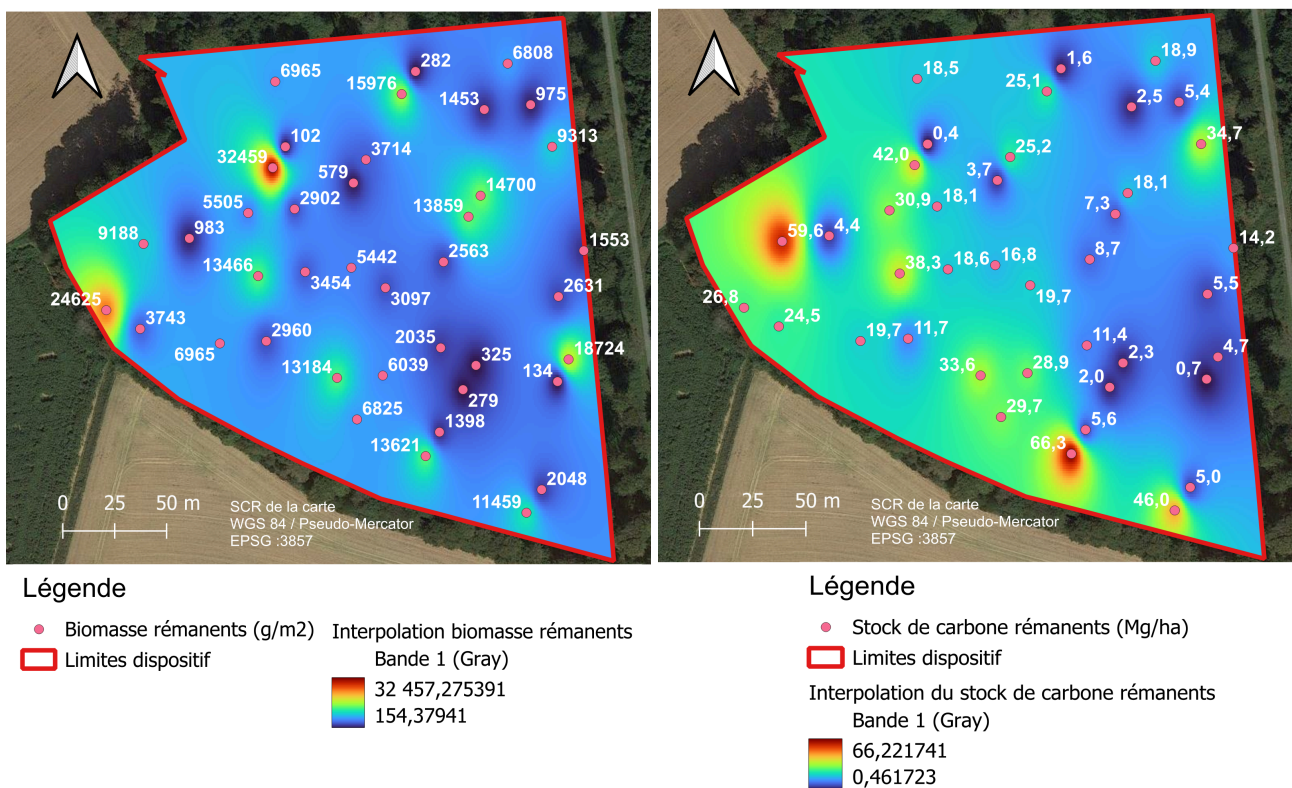


Fig.16 Carte de répartition de la biomasse de résanents avant broyage (à gauche) et carte de répartition du stock de carbone contenu dans les résanents avant broyage (à droite).

La répartition de la biomasse des résanents avant broyage indique des différences dans la répartition (Fig. 16). Sur la carte, le bleu correspond aux valeurs de biomasse les plus faibles et le rouge aux valeurs de biomasse les plus fortes. Le minimum atteint est de 102 g/m² et est situé au Nord-Ouest de la parcelle alors que le maximum atteint est de 32 459 g/m² et est également situé au Nord-Ouest. Les plus fortes valeurs de biomasse se trouvent à l'Ouest et au Nord-Ouest de la parcelle. Quelques valeurs intermédiaires se

trouvent sur le reste du site mais les valeurs de biomasse de la plus grande partie de la parcelle sont faibles.

La répartition des stocks de carbone dans le compartiment des rémanents avant broyage indique également des différences dans la répartition avec en bleu les valeurs de stocks les plus faibles et en rouge les valeurs les plus fortes (*Fig. 16*). La valeur de stock la plus faible est de 0,4 Mg/ha et la valeur la plus forte est de 66,3 Mg/ha. Ces valeurs sont respectivement situées au Nord-Ouest et au Sud de la parcelle. Pour la globalité de la parcelle, les valeurs de stock les plus fortes se situent au Sud et à l'Ouest même s'il y a présence de valeurs intermédiaires. Quelques valeurs intermédiaires se trouvent au Nord-Est, des valeurs faibles sont situées au Sud-Est et au Nord de la parcelle.

Estimation de l'effet du broyage

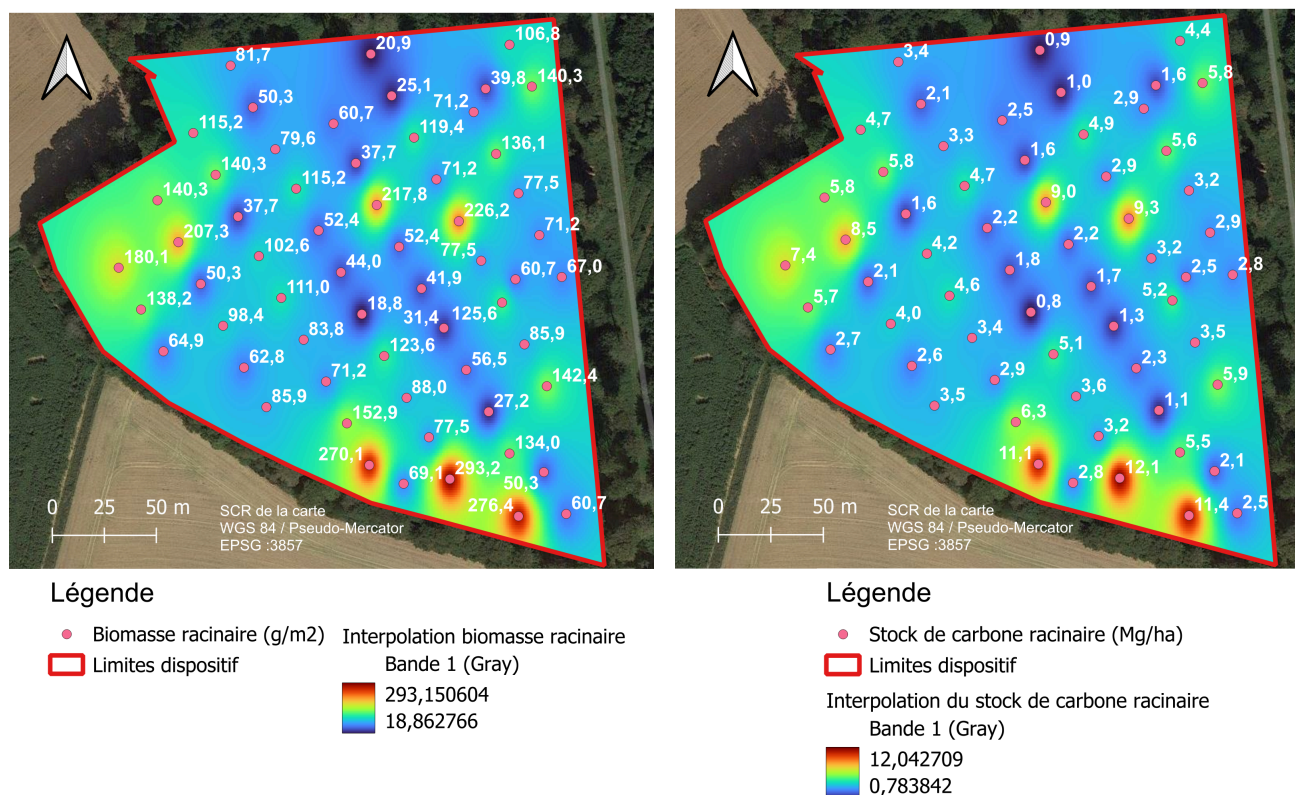


Fig. 17 Carte de répartition de la biomasse racinaire avant broyage (à gauche) et carte de répartition des stocks de carbone dans le compartiment racinaire avant broyage.

La répartition de la biomasse racinaire avant broyage indique des différences dans la répartition avec en bleu les valeurs de biomasse les plus faibles et en rouge les valeurs les plus fortes (*Fig. 17*). La plus faible valeur de biomasse est de 18,8 g/m² et est située au

centre de la parcelle et la plus forte valeur est de 293,2 g/m². Les zones avec les valeurs de biomasses les plus élevées sont situées au Sud, à l'Ouest et vers le centre de la parcelle. Les autres zones possèdent quant à elles des valeurs de biomasses faibles.

La répartition des stocks de carbone dans le compartiment racinaire avant broyage indiquent également des différences dans la répartition avec en bleu les valeurs de stocks de carbone les plus faibles et en rouge les valeurs les plus fortes (*Fig. 17*). Le minimum atteint est de 0,8 Mg/ha et est situé au centre de la parcelle et le maximum atteint est de 12,1 Mg/ha et est situé au Sud de la parcelle. Les zones de concentration les plus élevées de stock de carbone sont situées au Sud, à l'Ouest et vers le centre de la parcelle. Des zones de faibles valeurs de stocks se situent aussi au centre, comme sur le reste de la parcelle.

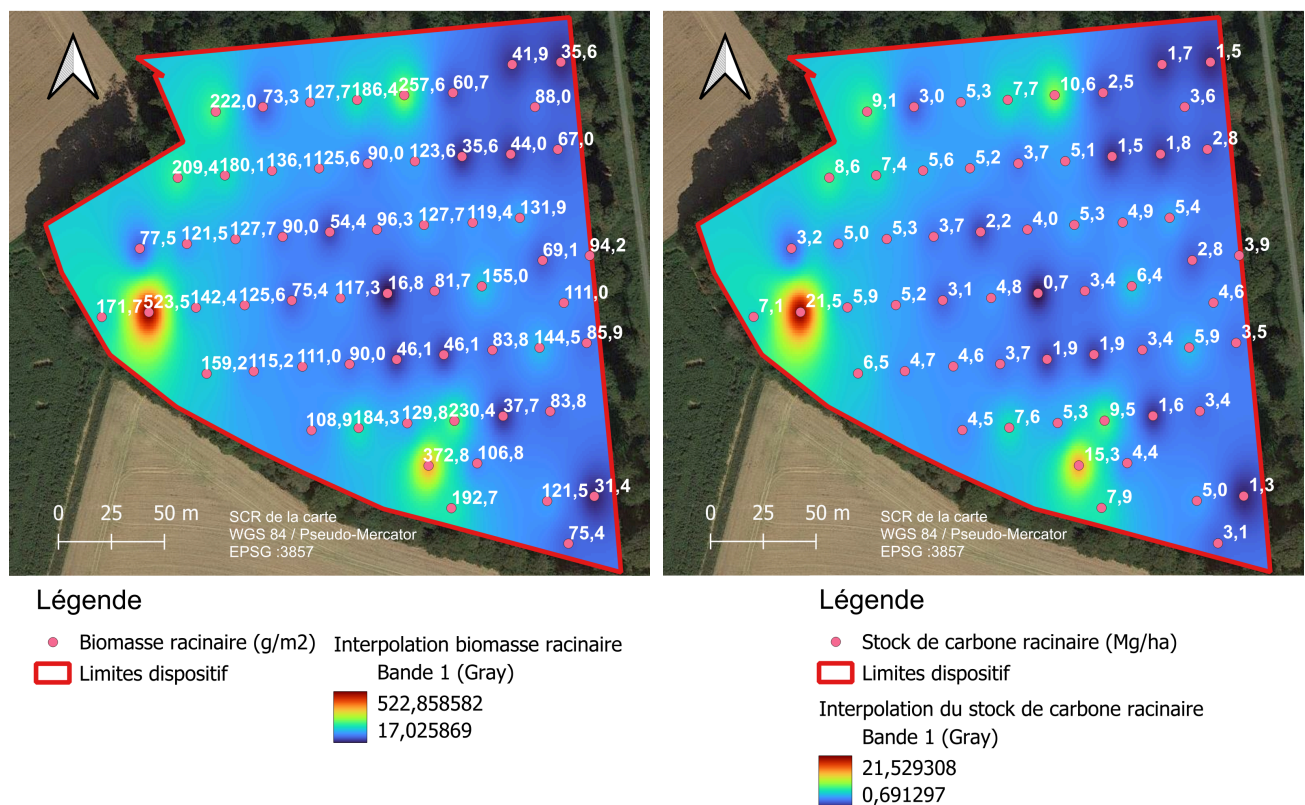


Fig.18 Carte de répartition de la biomasse racinaire après broyage (à gauche) carte de répartition des stocks de carbone dans le compartiment racinaire après broyage (à droite).

La répartition de la biomasse racinaire après broyage indique de nouveau des différences dans la répartition avec en bleu les plus faibles valeurs de biomasse et en rouge les valeurs les plus fortes (*Fig. 18*). Le minimum atteint est de 16,8 g/m² et le maximum est de 523,5 g/m². Ces valeurs sont respectivement situées au centre de la parcelle et à l'Ouest.

À l'Ouest et au Sud se trouvent les plus fortes valeurs de biomasses, au Nord-Ouest des zones de valeurs intermédiaires et des valeurs faibles sur le reste de la parcelle.

La répartition des stocks de carbone dans le compartiment racinaire après broyage indique des différences dans la répartition avec en bleu les plus faibles valeurs de stock de carbone et en rouge les valeurs les plus fortes (*Fig. 18*). La plus faible valeur atteinte est 0,7 Mg/ha et est située au centre de la parcelle alors que la valeur la plus forte est de 21,5 Mg/ha et est située à l'Ouest. Les zones avec les plus fortes valeurs de stock de carbone sont situées au Sud et à l'Ouest. Quelques zones avec des valeurs de stocks intermédiaires se trouvent au Nord-Ouest et le reste de la parcelle correspond à de faibles valeurs.

Une différence est observée entre les biomasses et les stocks de carbone du compartiment racinaire avant et après broyage. En effet avant broyage plusieurs de zones de fortes concentrations peuvent être trouvées sur la parcelle comme au Nord, au Sud et au Sud-Ouest alors qu'après broyage, la forte concentration de biomasse et de stock est concentrée en un point au Sud-Ouest.

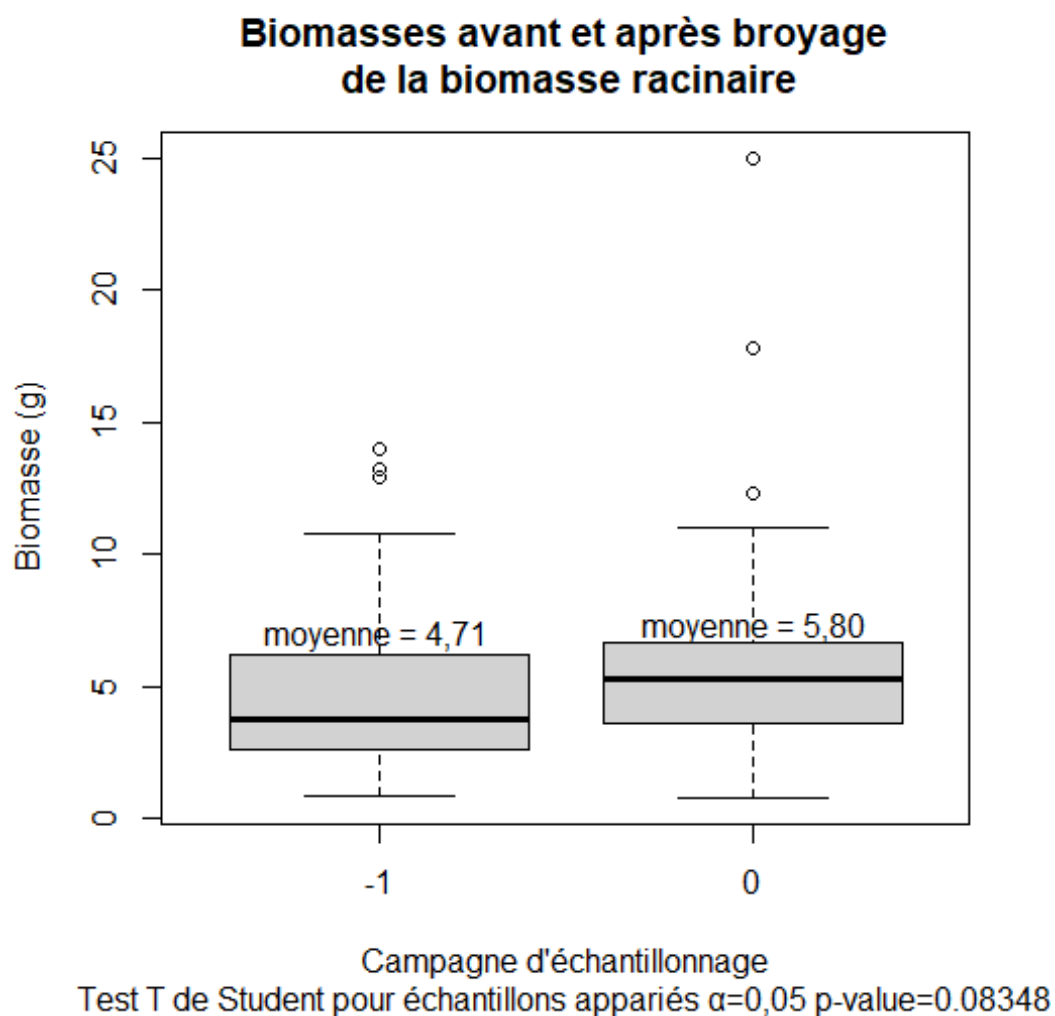


Fig. 19 Comparaison des biomasses racinaires avant (T-1) et après broyage (T0).

Les valeurs de biomasses observées vont de 0,8 à 25 g (Fig. 19). Avant broyage (T-1) la moyenne des biomasses est plus faible qu'après broyage (T0), en effet la moyenne avant broyage est de $4,71 \pm 0,986$ g alors que la moyenne après broyage est de $5,80 \pm 3,518$ g (Annexe 5). Cependant, la p-value est de 0,08348 donc la différence n'est pas significative entre les valeurs de biomasses racinaires avant et après broyage.

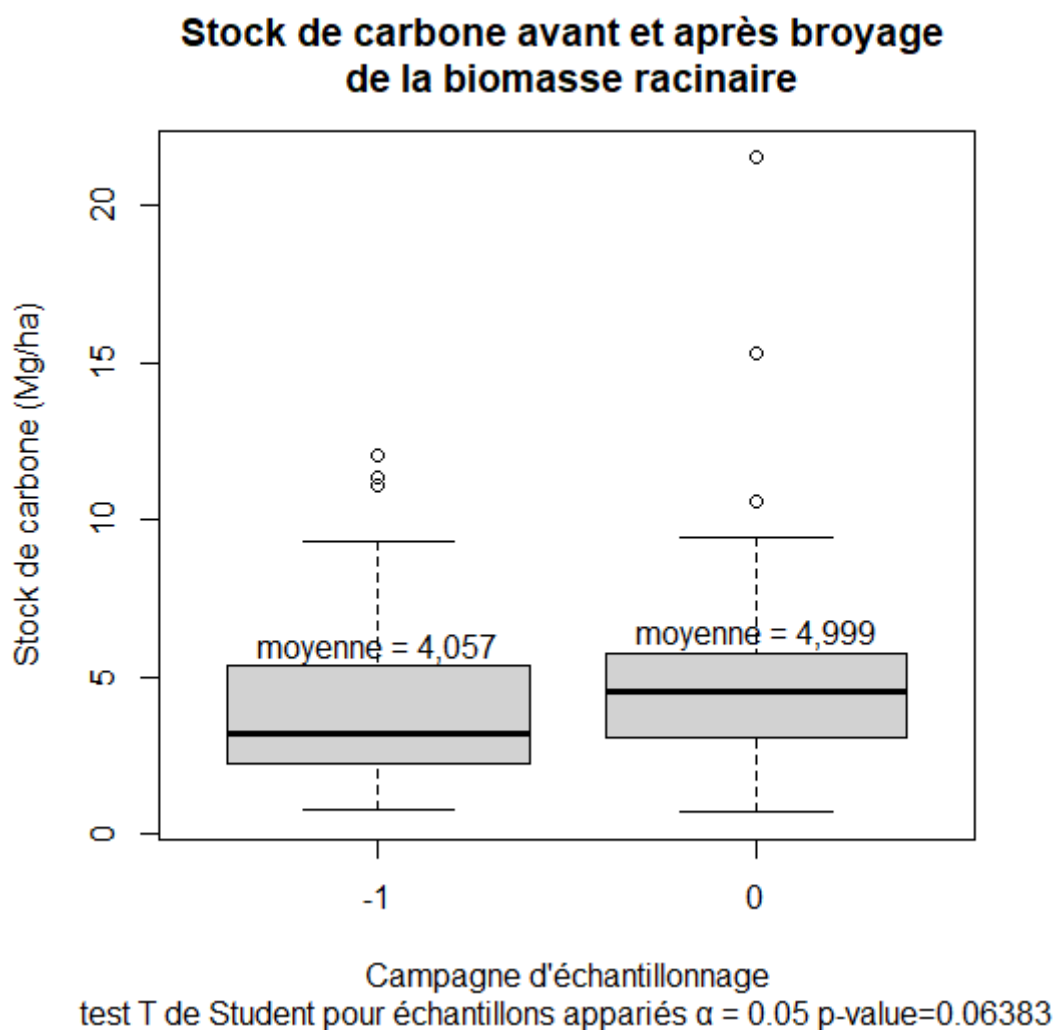


Fig. 20 Comparaison des stocks de carbone avant (T-1) et après broyage (T0) de la biomasse racinaire.

Les valeurs de stocks de carbone observées vont de 0,689 à 21,535 Mg/ha (Fig. 20). Avant broyage (T-1) la moyenne du stock de carbone est plus faible qu'après broyage (T0), en effet la moyenne avant broyage est de $4,057 \pm 2,604$ Mg/ha alors que la moyenne après broyage est de $4,999 \pm 3,366$ Mg/ha (Annexe 6). Cependant, la p-value est de 0,06383 donc la différence n'est pas significative. Les valeurs de stock de carbone avant et après broyage sont donc similaires.

Discussion

Ce stage porte sur la caractérisation initiale du dispositif expérimental en forêt domaniale indivise d'Eu et son objectif est de déterminer l'effet du broyage du parterre de coupe sur les entrées de carbone d'origine végétale dans le sol.

Dans le cadre de cette étude les hypothèses sont les suivantes :

- (1) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment aérien.
- (2) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment des rémanents.
- (3) La répartition de la biomasse avant broyage est similaire à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment racinaire.
- (4) Le broyage n'a pas d'effet sur les biomasses ni sur les stocks de carbone des différents compartiments végétaux.

Pour répondre à ces hypothèses, seule une partie des résultats est disponible, le reste des résultats sera obtenu lors de la suite du stage. Ainsi les tendances et significativités des résultats peuvent être amenées à évoluer.

Tout d'abord, la biomasse aérienne montre de fortes concentrations de biomasses au Nord, à l'Est et à l'Ouest de la parcelle (*Fig. 15*). D'autres zones comme le Sud et le centre de la parcelle montrent une faible répartition de biomasses. Cette répartition peut être expliquée par la topographie du site. En effet il existe deux pentes sur notre zone d'étude (*Fig. 21*). L'une de ces pentes part du Sud de la parcelle et est dirigée vers le Nord tandis que l'autre pente se dirige vers l'Ouest. Le Sud de la parcelle correspond donc au haut de la pente et se trouve à une altitude de 155,5 mètres, le Nord correspond quant à lui au bas de cette pente à une altitude minimale sur la parcelle de 151 mètres. Le bas de la pente

dirigée vers l'Ouest correspond à une altitude minimale de 149 mètres sur la parcelle. La littérature montre que la topographie influence la répartition de la biomasse de la végétation (Desprez Mathilde et al, 2009 ; Grosset et al. 2011; Pascal 1995 ; Yoka et al. 2010). De plus, la pente présente sur le site crée une accumulation de limon qui permet le développement de la biomasse aérienne et racinaire (SENEGAL 2007). Cette pente entraîne également la formation d'une accumulation d'eau qui est elle aussi bénéfique au développement des végétaux herbacés. Ces facteurs pourraient expliquer la plus grande quantité de biomasse et de stock en bas des pentes. Les bas de pentes correspondent aux zones de plus fortes valeurs de biomasse, indiquant que ces zones sont bien des zones d'accumulation préférentielles de biomasses.



Légende

- Limites dispositif
- Topographie

Fig. 21 Carte illustrant la topographie du dispositif expérimental, la topographie correspondant à des isolignes placées tous les 50 cm d'altitude.

En effet, pour les stocks de carbone du compartiment aérien, une concentration des valeurs de stocks les plus fortes a été observée à l'Ouest et au Sud de la parcelle tandis que l'Est, le Nord et le centre de la parcelle correspondent à des stocks intermédiaires à faible (Fig. 16). La transition entre ces valeurs ne se fait pas de manière continue. Une

similarité a été établie entre la biomasse et les stocks de carbone, des faibles valeurs de biomasse et de stock se trouvent au centre de la parcelle et de fortes valeurs de biomasse et de stock à l'Ouest de la parcelle. Cette similarité est aussi observée dans la littérature, plusieurs études ont montré une tendance à l'augmentation de la biomasse aérienne et des stocks de carbone dans les forêts (Magnússon et al. 2016). Le stock de carbone semble aussi être influencé par le type de végétation forestière (Ammiche, T., et al, 2016). Par conséquent, les résultats de l'étude montrent que la répartition de la biomasse avant broyage semble être liée à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment aérien, ce qui confirme l'hypothèse 1.

Pour continuer, la biomasse des rémanents indique de fortes concentrations à l'Ouest ainsi qu'au Nord-Ouest (*Fig. 16*). Des valeurs de faibles concentrations de biomasses se trouvent au Nord et au Sud-Est ainsi qu'au centre de la parcelle. Une piste d'explication de cette répartition hétérogène peut être le fait que les passants ont accès à la parcelle et sont autorisés à venir glaner du bois après la coupe d'exploitation. L'entrée de la parcelle se trouvant à l'Est, le glanage peut être plus important dans cette zone qui est plus facile d'accès. Le glanage peut expliquer les plus faibles concentrations de biomasses à l'Est et des plus fortes à l'Ouest (Vivier 1987).

Les valeurs de stock de carbone les plus fortes sont au Sud et à l'Ouest, alors qu'au Nord-Est et Ouest, les valeurs sont intermédiaires et au Sud-Est et au Nord de la parcelle les valeurs sont faibles. Le centre de la parcelle concentre des valeurs de biomasse faibles à intermédiaires (*Fig. 16*). La répartition des stocks suit celle des biomasses puisque des fortes valeurs se trouvent à l'Ouest et au Nord-Ouest. De même, de faibles valeurs sont présentes au Sud-Est, au Nord et au centre de la parcelle. Ainsi, la répartition de la biomasse avant broyage apparaît comme similaire à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment des rémanents, ce qui va dans le sens de l'hypothèse 2.

Ensuite, concernant la biomasse racinaire, les zones avec les biomasses les plus élevées sont situées au Sud, à l'Ouest et vers le centre de la parcelle. Des zones de faibles valeurs de biomasse sont retrouvées au centre de la parcelle (*Fig. 17*) tandis que la répartition des stocks de carbone du compartiment racinaire indiquent de fortes concentrations au Sud, à l'Ouest et au centre de la parcelle. Des zones de faibles valeurs sont également présentes au centre de la parcelle (*Fig. 17*). Le compartiment racinaire

étant directement lié au compartiment aérien, l'hétérogénéité des répartitions de biomasse et de stocks de carbone observée dans ce compartiment est également retrouvée dans le compartiment racinaire. Une parfaite similarité est observée entre les biomasses et les stocks de carbone dans le compartiment racinaire puisqu'au Sud, à l'Ouest et au centre de la parcelle des fortes valeurs sont retrouvées et au Nord de faibles valeurs pour les biomasses comme pour les stocks. Les résultats obtenus vont dans le sens des observations faites par Beugnon Aymeric et al, 2022. Ainsi, la répartition de la biomasse avant broyage est liée à la répartition des stocks de carbone au sol pour le compartiment racinaire, ce qui vérifie l'hypothèse 3.

Les résultats de l'étude montrent que pour les trois compartiments avant broyage les zones de concentrations majoritaires des fortes valeurs de biomasses et de stocks de carbone sont à l'Ouest tandis que de faibles valeurs sont retrouvées au centre de la parcelle créant une hétérogénéité. Pour chaque compartiment, les répartitions de ces deux paramètres sont équivalentes. Nous pouvons donc en déduire que la biomasse est liée au stock de carbone ce qui est étayé par la littérature (Tiendrebeogo et al. 2022).

De plus, la biomasse racinaire avant et après broyage n'est pas répartie de la même façon. La biomasse racinaire avant broyage présente des concentrations maximales au Sud et au Sud-Ouest (*Fig. 17*) alors que ces concentrations maximales sont situées au Sud-Ouest pour la biomasse racinaire après broyage (*Fig. 18*). Cependant, en plus des zones de biomasses racinaires maximales, des zones de fortes concentrations de ces biomasses sont également retrouvées au Nord de la parcelle avant broyage contrairement à la biomasse racinaire après broyage où la forte concentration est majoritairement observée en un point au Sud-Ouest. De plus, l'amplitude des valeurs de biomasses racinaires avant broyage est comprise entre 18,86 et 293,15 g/m² et est inférieure à la biomasse racinaire après broyage avec un intervalle compris entre 17,03 et 522,86 g/m². Cette différence d'amplitude est corroborée par les écarts types de ces deux campagnes, en effet l'écart type de la campagne avant broyage est de 0,986 alors que l'écart type de la campagne après broyage est de 3,518 (*Fig. 19*).

Les résultats des tests statistiques montrent une p-value de 0,08348 ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les biomasses avant et après broyage (*Fig. 19*). La quantité de biomasse est similaire entre les deux campagnes d'échantillonnage mais la répartition diffère.

Un phénomène similaire est observé pour la répartition des stocks de carbone, en effet les stocks du compartiment racinaire avant et après broyage ne sont pas répartis de la même façon. Avant broyage, les concentrations maximales se trouvent au Sud et au Sud-Ouest (*Fig. 17*) alors qu'après broyage elles se situent au Sud-Ouest (*Fig. 18*). Au Nord de la parcelle, en plus des zones de biomasses maximales se trouvent des zones de fortes concentrations de stock avant broyage. Au contraire, après broyage, le stock le plus important est majoritairement concentré en un point au Sud-Ouest. De plus, l'amplitude des valeurs de stock de carbone avant broyage est inférieure à celle après broyage. En effet, l'intervalle trouvé avant broyage est compris entre 0,78 et 12,04 Mg/ha et l'intervalle trouvé après broyage est compris entre 0,69 et 21,52 Mg/ha. La différence d'amplitude de valeur de stock entre les deux campagnes d'échantillonnage est corroborée par les écarts types trouvés. L'écart type de la campagne avant broyage est de 2,604 alors que l'écart type de la campagne après broyage est de 3,366 (*Fig. 20*). La différence d'amplitude constatée est moins importante que celle de la biomasse racinaire.

Enfin, les résultats des tests statistiques montrent une p-value de 0,06383 ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les stocks de carbone du compartiment racinaire avant et après broyage (*Fig. 20*). Le stock du compartiment racinaire est donc bien similaire entre les deux campagnes d'échantillonnage mais la répartition diffère. La littérature nous indique que le fauchage a aussi un faible impact sur le stockage de carbone, en effet une étude montre que la variabilité du stock de carbone est essentiellement liée à la variabilité de pluviométrie entre années tandis que l'effet de la fauche apparaît relativement faible (Gastal, Chabbi, and Klumpp 2013). Le fauchage comme le broyage consiste à couper la végétation et à la laisser sur place, les deux techniques sont donc possiblement comparables.

Pour finir, le broyage n'a pas d'effet sur la quantité de carbone sur la parcelle mais a un impact sur la répartition de la biomasse racinaire et sur le stock de carbone, ce qui va dans le sens de l'hypothèse 4.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce stage était de participer à une caractérisation initiale du dispositif expérimental de la forêt d'Eu et de déterminer l'effet du broyage du parterre de coupe sur les entrées de carbone d'origine végétale dans le sol.

La caractérisation a montré une hétérogénéité des répartitions de stocks de carbone et de biomasses. De plus, une similarité entre la répartition de la biomasse et la répartition du stock de carbone pour chaque compartiment a été observée (Magnússon et al. 2016).

L'évaluation des stocks avant et après broyage n'a pas montré de différence quantitativement significative pour le compartiment racinaire. Cependant, il a été observé que le broyage entraîne une différence entre les répartitions des stocks de carbone et des biomasses racinaires. Les résultats qui seront produits au cours de la suite du stage permettront de compléter les résultats actuels et d'observer les effets du broyage sur les deux autres compartiments (aérien et racinaire).

Ces résultats finaux, qui montreront semble-t-il, d'après les résultats actuels, une hétérogénéité dans la répartition des différents compartiments végétaux, pourront être mis en relation avec la disposition du dispositif expérimental et des répétitions de ses modalités de PMS. Il sera donc possible d'en déduire la répartition des entrées de carbone liées au broyage du parterre de coupe et de prendre en compte cet aspect dans l'évaluation de l'effet des modalités de PMS sur les stocks de carbone organique du sol.

Par ailleurs, l'étude a rencontré certaines limites. En effet, seuls 60 points de prélèvements ont été placés sur la parcelle et connaissant maintenant l'hétérogénéité du site tant au niveau topographique qu'au niveau de la répartition de la végétation des différents compartiments, augmenter la pression d'échantillonnage en positionnant plus de points de prélèvements aurait pu être pertinent pour avoir des résultats cartographiques plus précis. De plus, à certains endroits le broyage a pu impacter les premiers centimètres de sol, modifiant le niveau 0 du sol. De ce fait, la tarière racinaire devant être enfoncée de 15 centimètres aurait dû être enfoncée de quelques centimètres de moins ce qui n'a pas été pris en compte. Par conséquent, une part de la biomasse racinaire ne devant pas être prise en compte a été prélevée. Aussi, la méthode utilisée pour prélever les rémanents est

la méthode des transects mais d'autres méthodes existent permettant peut-être d'obtenir des résultats plus exhaustif. Cependant, ces méthodes sont souvent très chronophages.

Concernant les perspectives de cette étude, d'autres mesures auraient pu être réalisées. En effet le broyage réalisé est un broyage léger mais en gestion forestière il existe également le broyage lourd. Étudier les impacts de différentes méthodes de broyage sur un autre site d'étude permettrait d'augmenter la généralité des résultats et de possiblement documenter des effets du broyage du parterre de coupe d'un point de vue général. De plus, le projet CASTOR permet l'intervention de plusieurs partenaires de travail étudiant d'autres aspects que les stocks de carbone. Il serait donc intéressant d'étudier l'impact du broyage sur d'autres facteurs tels que la fertilité chimique du sol ou la diversité biologique du sol (Legout et al. 2014).

Bilan du stage

Bilan du stage : Pascaline

Ces six semaines au laboratoire ECODIV ont été très enrichissantes et m'ont tout d'abord permis de développer de nouvelles compétences. En effet, j'ai pu apprendre à me servir de nouveaux appareils de traitement et d'analyse d'échantillons que je n'aurais sans doute jamais eu l'occasion de découvrir. J'ai aussi pu développer mes compétences en cartographie SIG. Le travail sur le logiciel QGIS m'intéressait déjà auparavant et cet attrait s'est accru lors de la réalisation de nos cartes de résultats malgré quelques difficultés rencontrées pour leur réalisation. Ensuite ce stage m'a confirmé que le travail d'analyse de données devait être rigoureux, les inattentions ou oublis pouvant rendre le travail à effectuer par la suite bien plus complexe. J'ai également pu commencer à découvrir le travail de recherche en laboratoire d'écologie. Cette découverte était très intéressante et m'a donné envie d'en découvrir plus. J'ai aussi pu apprendre à m'adapter à de nouvelles conditions de travail, mais aussi à des imprévus et faire face à diverses difficultés rendant l'achèvement de notre travail encore meilleur. Pour finir, ce stage n'aurait sans doute pas été le même sans mes co-stagiaires, j'ai particulièrement apprécié notre bonne entente et notre entraide sans laquelle notre travail de groupe ne se serait pas aussi bien déroulé.

Bilan du stage : Dorine

Ces six semaines au laboratoire ECODIV m'ont permis de découvrir le travail en laboratoire. En effet, j'ai eu l'occasion de réaliser diverses manipulations en autonomie grâce aux explications claires reçues. J'ai notamment pu apprendre à utiliser du matériel différent de celui utilisé au cours de ma formation ce qui m'a permis de développer de nouvelles compétences. J'ai pu découvrir le dispositif du projet ainsi que traiter les données directement obtenues lors de mes manipulations au laboratoire créant une continuité dans mon travail, ce qui est enrichissant. J'ai aussi pu me familiariser avec la littérature scientifique. Ce stage m'a aussi permis d'approfondir mes connaissances sur le logiciel R et QGIS. J'ai aussi appris à m'adapter face aux changements de dernières minutes parfois rencontrés. Travailler à trois était un plaisir et m'a permis d'apprendre à créer une organisation optimale en se répartissant efficacement les tâches. L'accompagnement dont j'ai bénéficié m'a permis de me sentir à l'aise dans mes manipulations au laboratoire ou sur les différents logiciels utilisés. En somme, ce stage

m'a permis d'approfondir mes connaissances en écologie et d'avoir une première expérience professionnelle dans le domaine.

Bilan du stage : Tatiana

Ces six semaines de stage passées au laboratoire ECODIV m'ont offert l'opportunité de découvrir le travail en laboratoire. Ce stage a été très enrichissant car il m'a permis de découvrir le domaine professionnel de manière concrète. Cette expérience m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances et compétences. J'ai appris à utiliser des appareils de traitement et de nouveaux équipements dans le laboratoire. J'ai également réussi à approfondir mes connaissances sur le logiciel R et QGIS, ce qui a renforcé ma capacité à analyser des données statistiques. Aussi, j'ai appris à m'adapter à de nouvelles conditions de travail, surmonter diverses difficultés et à interagir avec de nouvelles personnes. De plus, la collaboration et la bonne entente avec mes co-stagiaires ont été essentielles pour la réussite de notre travail, favorisant un environnement harmonieux et productif. Enfin, ce stage a confirmé que ce domaine correspond parfaitement à mon projet professionnel, car je souhaite poursuivre une carrière dans ce secteur. Cette expérience a solidifié ma motivation pour le travail dans le laboratoire.

Bibliographie

Ammiche, Tawfik, and Abdellah Ait Taleb. Influence à court terme de type de végétation et du travail du sol sur le stock de carbone : cas d'une plaine agricole du nord de l'Algérie. 2016. Université Mouloud Mammeri. *dspace.ummto.dz*, <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/5275>.

Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie, 2ème édition revue et augmentée. INRA Paris 257.

Birot, Y. "La Recherche Scientifique et La Gestion Durable Des Forêts : La Contribution Française." *Revue Forestière Française*, no. S, 1996, p. 155. *DOI.org* (Crossref), <https://doi.org/10.4267/2042/26788>.

Beugnon, A. (2022). Influence de la végétation sur le stock de carbone organique: application à la compensation de l'activité minière dans le district de Sozak au Kazakhstan (Doctoral dissertation, ISTOM)

Collet, C., Akroume, E., Bureau, F., Cécillon, L., Deleuze, C., Derrien, D., Richter, C., Berthelot, A., 2018. Rapport du projet CAPSOL : Dynamique du Carbone et de la croissance après Préparation du SOL dans les plantations forestières. Coupes de régénération : renouveler progressivement la forêt [WWW Document], 2021.

Desprez, Mathilde, et al. « Organisation et propriétés des sols du nord de la Guyane française en lien avec la dynamique forestière ». *Conference Knowledge-Based Management of Tropical Rainforests, Cayenne, Guyane française, 22-28 novembre 2009*, 2009, <https://agritrop.cirad.fr/554495/>.

European Environment Agency. *European Forest Ecosystems: State and Trends*. Publications Office, 2016. *DOI.org* (CSL JSON), <https://data.europa.eu/doi/10.2800/964893>.

SENEGAL, SALOUM ESTUARY IN. 2007. "Influence Du pH, de La Salinité de l'eau et de La Texture Du Sol Sur La Végétation de La Mangrove de l'estuaire Du Saloum Au Sénégal." *Journal Des Sciences et Technologies* 5 (1): 8–17. (SENEGAL 2007)

Gastal, Francois, Abad Chabbi, and Katja Klumpp. 2013. "L'évolution Du Stock de Carbone Dans Les Systèmes à Base de Prairies: Premiers Résultats Du Système d'observation et de Recherche En Environnement ACBB." In , 41-p.

Grosset, Yolaine, AC Richer de Forges, Julie Demartini, NPA Saby, MP Martin, Jeroen Meersmans, and Dominique Arrouays. 2011. "Une Analyse Des Facteurs de Contrôle de La Distribution Des Teneurs En Carbone Des Horizons Superficiels Des Sols de Corse." *Etude et Gestion Des Sols* 18 (4): 259–69.

Pascal, J-P. 1995. "Quelques Exemples de Problèmes Posés à l'analyste et Au Modélisateur Par La Complexité de La Forêt Tropicale Humide." *Revue d'Ecologie, Terre et Vie* 50 (3): 237–49.

Korboulewsky, Nathalie, Isabelle Bilger, and Abdelwahab Bessaad. 2021. "How to Evaluate Downed Fine Woody Debris Including Logging Residues?" *Forests* 12 (7): 881.

Lal, Rattan. 2005. "Forest Soils and Carbon Sequestration." *Forest Ecology and Management* 220 (1–3): 242–58.

Legout, Arnaud, Claudine Richter, Noémie Pousse, Gregory van Der Heijden, Jean-Louis Morel, François Charnet, Marie-Odile Simonnot, and Jacques Ranger. 2014. "Compensation Des Exportations Minérales et Remédiations Aux Dégradations Des Sols. Compte Rendu de l'atelier 3." *Revue Forestière Française* 66 (4): 547–57.

RÉSOBIO, SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE. 2015. "GESTION DES RÉMANENTS FORESTIERS: PRÉSERVATION DES SOLS ET DE LA BIODIVERSITÉ."

Lévêque, C, and JC Mounolou. 2001. "Biodiversité. Dynamique Biologique et Conservation, Dunod."

Magnússon, Rúna Í, Albert Tietema, Johannes HC Cornelissen, Mariet M Hefting, and Karsten Kalbitz. 2016. "Tamm Review: Sequestration of Carbon from Coarse Woody Debris in Forest Soils." *Forest Ecology and Management* 377:1–15.

Tiendrebeogo, Nebnoma Romaric, Paulin Ouoba, Brigitte Bastide, Marie Yvette Blandine Nacoulma, Yempabou Hermann Ouoba, Félix Djuiguemde, Dieudonné Ki, Irénée Somda, and Issiaka Joseph Boussim. 2022. "Influence Des Attributs Forestiers Sur Le Stock de Carbone Des Unités de Végétation Sud-Soudaniennes Au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 38 (2): 271–85.

Vivier, Michel. 1987. "Cueillir et Glaner Dans La Forêt Normande." *Journal d'agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée* 34 (1): 95–111.

Yoka, J, JJ Loumeto, J Voudibio, B Amiaud, and D Epron. 2010. "Influence Du Sol Sur La Répartition et La Production de Phytomasse de Savanes de La Cuvette Congolaise (République Du Congo)." *Geo. Eco. Trop* 34:63–74.

Webographie

INRAE, Projet CASTOR

<https://renfor.hub.inrae.fr/projets/castor>

Office National des Forêts, Les rémanents ces branches laissées au sol après une coupe en forêt

<https://www.onf.fr/onf/+7eb::les-remanents-ces-branches-laissees-au-sol-apres-une-coupe-en-foret.html#:~:text=Les%20r%C3%A9manents%20sont%20de%20morceaux,ou%20des%20bourgeons%2C%20se%20d%C3%A9composent.>

Retsch, Vibro-broyeur MM 400

https://www.retsch.fr/fr/produits/broyer/broyeurs-a-billes/vibro-broyeurs-mm-400/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw9vqyBhCKARIsAlIcLMG5tRvfbxHcykNvGn9DHHpQc7Ggwy_bYuxfEvJ6LK7lhqS7mohxhXkaAoRbEALw_wcB

Annexes

Annexe 1 : Fiche technique broyeur RETSCH MM 400

<https://www.retsch.fr/files/170071/mm-400.pdf>

Annexe 2 : Fiche technique broyeur RETSCH MM 500 Vario

<https://www.retsch.fr/files/83470/mm-500-vario.pdf>

Annexe 3 : Fiche technique CHN

http://s3.ceelantech.com/docs/Consumables_Flash2000.pdf

Annexe 4 : Fiche technique BALANCE DE PRÉCISION

<https://www.mt.com/dam/P5/labtec/phased-out/1-documents/at-ba-f-11780210.pdf>

Annexe 5 : Script R pour les biomasses

```
getwd()
```

```
racines<-read.table("racines.csv",sep=";",header=TRUE)  
racines
```

```
#sous partie des données avec uniquement le avant broyage  
avant<-subset(racines,T==-1)  
avant
```

```
#sous partie des données avec uniquement le après broyage  
apres<-subset(racines,T==0)  
apres
```

```
#Tests statistiques
```

```
#Question biologique
```

```
#Y a t-il une différence significative entre les masses avant et après broyage ?
```

```
#H0: il n'y a pas de différence significative entre les masses avant et après broyage
```

```
#H1 : Il y a une différence significative entre les masses avant et après broyage
```

```
#choix du test: on a 2 échantillons appariés, il faut vérifier la normalité des données pour  
pouvoir réaliser le Test T de student pour échantillons appariés
```

```
#Vérification de la normalité
```

```
#Test de Shapiro pour tester la normalité des données
```

```
#H0: il n'y a pas de différence significative entre les données et les données si elles sont  
normales
```

```
#H1 : Il y a une différence significative entre les données et les données si elles sont  
normales
```

```
AV<-avant$Masse
AV
```

```
shapiro.test(AV)
#p-value = 1.244e-05 < 0.05
```

```
shapiro.test(log(AV))
#p-value = 0.7882
#p-value > 0.05 Donc H0 est validée, il y a normalité des données
```

```
AP<-apres$Masse
AP
```

```
shapiro.test(AP)
#p-value = 5.751e-08 < 0.05
shapiro.test(log(AP))
#p-value = 0.3489
#p-value>0.05 donc H0 est validée, il y a normalité des données
```

```
#La normalité des données étant vérifiée, on peut réaliser le test T de Student pour
échantillons appariés
```

```
t.test(AV,AP,paired=T,var.equal=F,alt="two.sided")
#p-value 0.08348 > 0.05 donc on accepte H0
#réponse biologique: il n'y a pas de différence significative entre les masses avant et
après broyage
```

```
mean(AV)
mean(AP)
```

```
boxplot(racines$Masse~racines$T,xlab="Campagne d'échantillonnage",ylab="Biomasse
(g)",main="Biomasses avant et après broyage\n de la biomasse racinaire",sub="Test T de
Student pour échantillons appariés  $\alpha=0,05$  p-value=0.08348")
```

```
text(locator(1),c("moyenne = 4,71"))
text(locator(1),c("moyenne = 5,80"))
```

```
sd(AV)
sd(AP)
```

Annexe 6 : Script R pour les stocks de carbone

```
getwd()
```

```
racines<-read.table("racines.csv",sep=";",header=TRUE)
racines
```

```
#sous partie des données avec uniquement le avant broyage
avant<-subset(racines,T==1)
avant
```



```
#sous partie des données avec uniquement le après broyage
apres<-subset(racines,T==0)
apres
```

```
#Tests statistiques
```

```
#Question biologique
```

```
#Y a t-il une différence significative entre les stocks de carbone avant et après broyage ?
```

```
#H0: il n'y a pas de différence significative entre les stocks de carbone avant et après broyage
```

```
#H1 : Il y a une différence significative entre les stocks de carbone avant et après broyage
```

```
#choix du test: on a 2 échantillons appariés, il faut vérifier la normalité des données pour pouvoir réaliser le Test T de student pour échantillons appariés
```

```
#Vérification de la normalité
```

```
#Test de Shapiro pour tester la normalité des données
```

```
#H0: il n'y a pas de différence significative entre les données et les données si elles sont normales
```

```
#H1 : Il y a une différence significative entre les données et les données si elles sont normales
```

```
AV<-avant$stockC
```

```
AV
```

```
shapiro.test(AV)
```

```
#p-value = 1.244e-05 < 0.05
```

```
shapiro.test(log(AV))
```

```
#p-value = 0.7882
```

```
#p-value > 0.05 Donc H0 est validée, il y a normalité des données
```

```
AP<-apres$stockC
```

```
AP
```

```
shapiro.test(AP)
```

```
#p-value =5.753e-08 < 0.05
```

```
shapiro.test(log(AP))
```

```
#p-value = 0.3488
```

```
#p-value>0.05 donc H0 est validée, il y a normalité des données
```

```
#La normalité des données étant vérifiée, on peut réaliser le test T de Student pour échantillons appariés
```

```
t.test(AV,AP,paired=T,var.equal=F,alt="two.sided")
```

```
#p-value 0.08346 > 0.05 donc on accepte H0
```

```
#réponse biologique: il n'y a pas de différence significative entre les stocks de carbone avant et après broyage
```

```
mean(AV)
```

```
mean(AP)
```

```
boxplot(racines$stockC~racines$T,xlab="Campagne d'échantillonnage",ylab="Stock de  
carbone (Mg/ha)",main="Stocks de carbone avant et après broyage \n de la biomasse  
racinaire",sub="Test T de Student pour échantillons appariés  $\alpha=0,05$  p-value=0.06383")
```

```
text(locator(1),c("moyenne=4,057"))
```

```
text(locator(1),c("moyenne=4,999"))
```

```
sd(AV)
```

```
sd(AP)
```

Résumé

Dans un contexte de changement global, la place des écosystèmes forestiers dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre est essentielle, en effet le stockage du carbone dans les sols est considéré comme un levier d'action important dans l'atténuation du changement climatique. Dans le cadre du projet CASTOR, un dispositif expérimental a été mis en place pour étudier la réponse de diverses propriétés du sol à des pratiques de préparation mécanisée du site. La réalisation d'une caractérisation initiale du site ainsi qu'une détermination de l'effet du broyage léger du parterre de coupe sur les entrées de carbone d'origine végétale dans le sol était nécessaire. Pour cela, le traitement d'échantillons de biomasses aériennes, racinaires et de rémanents déjà prélevés a été réalisé. Ces échantillons ont été tamisés, séchés, broyés puis passés à l'analyseur CHN. Des cartes de répartition de biomasse et de stocks de carbone des trois compartiments ont montré que la répartition avant broyage est hétérogène et que la répartition de la biomasse est similaire au stock. De plus, des tests statistiques ont révélé que la quantité de carbone et de biomasse sur le dispositif ne change pas significativement après le broyage. Le broyage impact donc la répartition mais pas la quantité. L'inégalité des répartitions de stocks de carbone sur la parcelle pourra être prise en compte dans les résultats obtenus après préparation mécanisée du site (PMS) pour la suite de l'étude.

Mots-clefs : broyage, stock de carbone organique, caractérisation initiale, biomasse, renouvellement forestier