

# Mémoire de stage

présenté par  
Rozenn BOURQUIN

effectué du 02/04/2024 au 28/06/2024  
à l'Office National des Forêts (ONF)  
pôle Recherche, Développement et Innovation (RDI)  
21 rue du Muguet, 39000 Dole

Master 1 Biodiversité, écologie, évolution  
parcours Biodiversité végétale et gestion des écosystèmes tropicaux (BIOGET)

Sujet :  
**Evaluer les effets à court terme de la préparation  
mécanisée du site (PMS) sur la structure du sol en contexte  
de plantation forestière**

Tutrice : Dr Emila AKROUME

soutenu publiquement le 09 juillet 2024

à Montpellier

devant le jury suivant :

Dr Franck RICHARD

Rapporteur

Dr Éric MARCON

Examineur



# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné de près ou de loin à la réalisation de ce stage.

Tout d'abord, je remercie l'Office National des Forêts (ONF) pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer mon stage au sein de leur structure, et plus spécifiquement au pôle Recherche, Développement et Innovation (RDI) de Dole. Je suis particulièrement reconnaissante envers ma tutrice de stage Emila AKROUME, chargée de Recherche & développement. Je la remercie pour son temps, ses explications, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de cette expérience. Son expertise et son soutien ont été d'une grande aide pour le bon déroulement de mon stage.

Je souhaite remercier les personnes du laboratoire ECODIV à Rouen, qui m'ont aidée et accompagnée lors des relevés de terrain. J'aimerais remercier Lucas POUILLARD et Pierre GANAUD. Je souhaite également remercier en particulier Noémie POUSSE, chargée R&D pédologie au pôle RDI à l'ONF, sans qui les analyses et résultats présentés dans ce rapport m'auraient pris beaucoup plus de temps.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe RDI du pôle de Dole et mes collègues, Antoine BILLARD, Salomé FOURNIER, Thomas COORDONNIER, Stephen COSSET, Didier BIER, Axelle PROUVOT, Antoine FERGEAU et Gaspard DELCROIX pour leur accueil chaleureux. Leur présence et leurs encouragements ont rendu mon stage enrichissant et agréable. Leurs discussions aux pauses café serties de bonnes doses d'humour m'ont permis de beaucoup rigoler.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Eric MARCON, mon encadrant académique, pour sa supervision, ses précieux conseils et sa confiance. Merci aussi aux professeurs et à mes collègues du Master BioGET de l'Université de Montpellier pour leur aide tout au long de ma formation.

Enfin, je remercie sincèrement ma famille et mes amis pour leur soutien sans faille et leurs encouragements constants. Leur présence et leur soutien moral ont été indispensables à la réussite de ce projet.



## RESUME

Cette étude s'insère dans un contexte de plantation forestière et présente les effets sur les propriétés physiques du sol de différentes modalités de préparation mécanisée du site (PMS) : potets (POT), sous-solage tracté (SST) et travail du sol en plein (TRP). Les résultats montrent que la modalité SST améliore significativement les propriétés physiques du sol en réduisant la compaction sans entraîner la diminution des couches du sol de bonne structure. En revanche, les modalités POT et TRP ne montrent pas d'effets significativement différents du témoin au niveau de la réduction des couches du sol de structure compacte. Les techniques localisées telles que POT et SST sont conseillées pour à la fois préserver la structure du sol et améliorer les conditions de croissance des plants. Les techniques d'inversion et de mélange du sol sur l'ensemble de la parcelle, comme le TRP, doivent être utilisées avec prudence, car elles peuvent endommager la structure du sol. Ce rapport de stage s'intègre dans le cadre du projet CASTOR et a pour but de fournir des recommandations pratiques pour la gestion des sols forestiers, en privilégiant des techniques de PMS qui assurent à la fois la réussite du reboisement et la durabilité des sols.

## ABSTRACT

This study is set within the context of forest plantation and examines the effects of different mechanized site preparation (MSP) techniques on the physical properties of the soil: pitting (POT), subsoiling (SST), and full-area tillage (TRP). The results show that the SST technique significantly improves the soil's physical properties by reducing compaction without decreasing the layers of "well-structured" soil. In contrast, the POT and TRP techniques do not show significantly different effects from the control in reducing the layers of "poorly structured" soil. Localized techniques such as POT and SST are recommended to both preserve soil structure and improve the growing conditions for plants. Full-area tillage techniques like TRP should be used with caution, as they can damage soil structure. This internship report is part of the CASTOR project and aims to provide practical recommendations for forest soil management, favoring MSP techniques that ensure both successful reforestation and soil sustainability.



# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	1
RESUME .....	3
ABSTRACT .....	3
TABLE DES MATIERES .....	5
1. INTRODUCTION .....	7
1.1. Contexte et enjeux .....	7
1.2. Etat de l’art .....	8
1.3. Problématique et objectifs .....	8
1.4. Démarche générale et hypothèses .....	9
2. MATERIEL ET METHODES .....	10
2.1. Site d’étude .....	10
2.2. Acquisition des données .....	11
2.2.1. Le test-bêche .....	11
2.2.2. Le sondage PANDA® .....	11
2.2.3. L’échantillonnage .....	12
2.3. Analyse des données .....	13
3. RESULTATS .....	14
3.1. Comparaison de la structure du sol avant/après PMS sur le site expérimental .....	14
3.2. Résultats de l’évaluation des modalités de PMS par test-bêche .....	15
3.2.1. Fréquence des notes de structure par modalité .....	15
3.2.2. Note moyenne de l’état structural par modalité .....	16
3.2.3. Proportion de structure « bonne », « moyenne » et « compacte » par modalité .....	16
3.2.4. Proportion de structure lamellaire par modalité .....	17
3.3. Effets des modalités de PMS avec le PANDA® .....	18
4. DISCUSSION .....	21
4.1. Effets des modalités POT et TRP sur la structure du sol .....	21
4.2. Effets de la pratique du SST sur la qualité du sol .....	22

4.3. Influence des conditions environnementales et pédologiques sur la structure du Sol	22
5. CONCLUSION .....	24
6. REFERENCES.....	25
7. LISTE DES ABREVIATIONS.....	27
8. TABLE DES TABLEAUX .....	29
9. TABLE DES FIGURES.....	31
10. ANNEXES .....	33
TABLE DES ANNEXES .....	33
Annexe 1 : Carte de localisation du dispositif et de la parcelle 80 en forêt domaniale indivise d’eu	34
Annexe 2 : Clé de détermination de la note de structure du sol	35

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. CONTEXTE ET ENJEUX

Le dépérissement forestier, un phénomène préoccupant, désigne la dégradation de l'état de santé des forêts. Actuellement, les dépérissements en forêt en France sont de plus en plus fréquents. Près de 670 000 hectares sont affectés en 2023 (IGN, 2023). Plusieurs facteurs contribuent à ce problème. Les principaux sont les extrêmes climatiques, les insectes ravageurs, les champignons pathogènes ou encore le tassement des sols forestiers dû à leur exploitation (Vennetier, 2012). Le changement climatique provoque l'augmentation de contraintes abiotiques, à l'origine de dépérissements comme la hausse des températures qui induit des vagues de chaleur extrêmes, ou la modification du régime des pluies conduisant des épisodes de sécheresses.

De plus, la mécanisation de la sylviculture s'est souvent traduite par une utilisation accrue d'engins lourds et puissants pour réaliser diverses opérations sylvicoles. Les dépérissements induits par des sols fortement tassés peuvent résulter de passages répétés d'engins d'exploitation sur sa surface (Pousse *et al.*, 2022).

Reconstituer les parcelles forestières détériorées et adapter les peuplements est indispensable afin de préserver les fonctions assurées par les écosystèmes forestiers. Le mode de renouvellement forestier se partage entre la régénération naturelle et la plantation. Dans le cas général, le recours à la plantation se fait uniquement si la régénération naturelle en premier lieu n'a pas fonctionné. Dû aux forts dépérissements depuis 2018, ce recours à la plantation est amené à augmenter sensiblement. La forêt française couvre 17 millions d'hectares en 2021 (SDES, 2021) en métropole dont au minimum 2,1 millions d'hectares régénérés par plantation (IGN, 2017).

Néanmoins, la réussite de la plantation peut se trouver compromise en cas de contraintes édaphiques ou climatiques élevées. C'est pourquoi la plantation est souvent précédée d'une Préparation Mécanisée du Site (PMS), qui consiste en un travail réalisé à l'aide de machines en amont de la mise en place des plants. L'objectif est de réduire les contraintes qui peuvent compromettre l'installation et le développement des plants (Collet *et al.*, 2016), afin d'augmenter les chances de survie de la plantation.

La PMS est une alternative à l'usage des produits phytosanitaires, et son utilisation en France a progressivement augmenté parallèlement à l'abandon de l'usage des herbicides en forêt (Vast *et al.*, 2020). Un de ses principaux objectifs est de réduire le développement de la végétation spontanée qui entre en compétition avec les jeunes plants. (Dassot *et al.*, 2017). La PMS peut être aussi prescrite pour tenter de restaurer les sols tassés (Goutal, 2012). Cette optimisation des conditions du sol induit une meilleure pénétration des racines, donc une amélioration la croissance des jeunes plants. Elle permet également de faciliter le travail des ouvriers planteurs (Collet *et al.*, 2016) et de réduire les dommages causés par les insectes, petits mammifères ou oiseaux (Löf *et al.*, 2012). C'est pourquoi la PMS joue aujourd'hui un rôle important dans un contexte de plantation forestière. Mis à part ces bénéfices reconnus de la PMS sur la croissance des plants, l'effet de la PMS sur le fonctionnement des sols forestiers n'est pas aussi bien documenté.

Ce stage entre dans le cadre du projet CASTOR (Comportement du CARbone STOCKé dans les sols lors de la Reconstitution des peuplements forestiers par plantation avec préparation mécanisée du site) financé par l'Ademe (2023-2026). Ce projet a pour objectif d'identifier et de documenter des méthodes de PMS avant plantation offrant les meilleurs

compromis entre réussite de plantation et moindre perturbation des fonctions des sols. Pour ce faire, une expérimentation in situ testant différentes méthodes de PMS plus ou moins localisées est réalisée, afin de comprendre le fonctionnement des sols forestiers (carbone stocké, fertilité minérale, diversité biologique) et les modifications induites par ces perturbations. Ce projet comporte un volet important sur la dynamique du carbone dans le sol, un autre volet sur la biodiversité du sol et un volet sur les propriétés physiques. Ce stage entre donc spécifiquement dans la partie du projet qui s'intéresse aux effets de la PMS sur les propriétés physiques des sols forestiers.

## 1.2. ETAT DE L'ART

La structure est une caractéristique fondamentale des propriétés physiques du sol qui détermine la fertilité, la rétention d'eau et la santé générale des écosystèmes terrestres (Ranger *et al.*, 2020). La structure, de sa définition, est le mode d'arrangement spatial des particules minérales et organiques d'un sol entre elles. Elle est caractérisée par deux principaux paramètres : la taille des mottes, leur manière de s'agencer entre elles et la porosité. La porosité est définie par la proportion d'espaces vides (les pores) entre les particules de sol. Ces pores sont essentiels pour la circulation de l'eau et de l'air dans le sol. Des agrégats stables améliorent la résistance à l'érosion et facilitent l'infiltration de l'eau dans le sol. Une bonne structure favorise donc la croissance des plants en optimisant l'eau, l'air et les nutriments disponibles.

Un sol compacté rend difficile l'exploration par les racines, limitant ainsi la croissance en hauteur des plantes et augmentant leur taux de mortalité (Kees, 2008). Les vers de terre, qui jouent un rôle crucial dans la structure du sol, ont du mal à survivre dans les sols compactés. De plus, la capacité d'infiltration verticale de l'eau est diminuée, ce qui entraîne des problèmes d'engorgement en surface et, à l'inverse, une asphyxie en profondeur (Pousse *et al.*, 2023).

Il existe une grande variété d'outils de PMS et chacun a été conçu pour lever un jeu de contraintes spécifiques (Collet *et al.*, 2016). Le type et l'intensité des modifications induites varient donc fortement selon le type de sol, le type d'engin et les outils utilisés (Prévoist 1992, Löf *et al.*, 2012). Des outils légers montés sur mini-pelle ont été développés et permettent de réaliser une préparation localisée et ont moins de risques de tasser le sol, à l'inverse des outils traditionnels tractés qui effectuent un travail du sol en ligne à l'échelle parcellaire (Dassot *et al.*, 2017).

La PMS implique l'usage d'engins qui provoquent des perturbations des propriétés physiques des sols forestiers, comme sur la densité apparente (Löf *et al.*, 2012). Certains travaux montrent des effets contrastés de la PMS sur la structure du sol, avec des effets positifs pour l'installation des plants mais dans d'autres cas, des effets négatifs comme la création de zones de sol compacté (Vast *et al.*, 2020). La perturbation du sol et la perturbation de la végétation spontanée par la PMS augmentent également les émissions de CO<sub>2</sub> (Tyree *et al.*, 2006) et accroissent les risques d'érosion des sols (Carling *et al.*, 2001).

C'est pourquoi il est important de comprendre dans l'intégralité les effets de différentes techniques de PMS sur le sol et les jeunes plants.

## 1.3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Apporter des connaissances sur les effets de ces pratiques est important afin d'aider les reboiseurs à choisir les meilleures méthodes de renouvellement des forêts. Sur le plan pratique, les acteurs ont besoin d'outils de diagnostic fiables et accessibles pour évaluer la qualité et la sensibilité des sols forestiers et ainsi optimiser leurs choix de gestion. La maîtrise des techniques de plantation et des connaissances des sols par les gestionnaires et opérateurs forestiers est essentielle, surtout avec l'augmentation des chantiers de reforestation. Les résultats du projet CASTOR permettront de fournir à terme des indicateurs de sensibilité des sols à différents types de PMS. Ceci permettra notamment de mettre en balance les avantages écologiques de pratiques moins impactantes pour les sols, avec leurs éventuels surcoûts pour, à terme, inciter à leur adoption par les professionnels.

Quels sont les effets à court terme des différents outils de PMS sur la structure des sols ? Les principales hypothèses sont que (i) le travail du sol de manière générale permettrait la réduction de la compaction du site et (ii) les modalités de PMS travaillant sur une surface plus importante permettent une amélioration supérieure de la structure du sol. Cette étude s'attache donc à mesurer et comparer les effets de trois techniques de PMS sur les propriétés physiques du sol (structure, porosité, compaction). Cette recherche s'inscrit dans un but d'aider les gestionnaires forestiers à choisir la méthode la plus adaptée du travail du sol, selon leurs objectifs et conditions spécifiques. En abordant ces questions, cette étude contribue à une meilleure compréhension des effets à court terme de la PMS en contexte de plantation forestière, avec l'objectif de promouvoir des pratiques de gestion forestière durables et efficace.

## 1.4. DEMARCHE GENERALE ET HYPOTHESES

Cette étude propose d'examiner les effets immédiats de trois techniques spécifiques de PMS, plus ou moins localisée : le travail du sol en potets (POT), le travail du sol en plein (TRP) et le sous-solage tracté (SST). Le sous-solage est considéré comme un travail du sol localisé sur la ligne, qui ne mélange pas les différentes couches du sol entre-elles. Seul un sillon d'environ 40 à 50 cm de profondeur est creusé le long des lignes de plantation. Le travail du sol en potets consiste à dégager la végétation à l'aide d'un peigne sur un carré d'environ 60 cm de côté puis à creuser des trous individuels pour chaque plant, offrant ainsi une préparation ciblée du sol. Les potets sont creusés à une profondeur d'environ 40-50 cm, et au sein du potet le sol subit un décompactage, qui peut s'accompagner d'un mélange de ses différentes couches. Le travail du sol en plein implique une préparation uniforme, de la même manière que les potets mais sur toute la surface à préparer. Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients potentiels, qu'il est essentiel de comprendre pour optimiser les pratiques de reboisement.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. SITE D'ETUDE

Le site d'étude a été choisi selon des critères précis : peu d'éléments grossiers (EG) sur 60 cm, sol à dominante limoneuse, en forêt publique et à antécédent de feuillus. Après prospection de plusieurs sites, la parcelle sélectionnée est la parcelle 80 qui se situe dans la forêt domaniale indivise d'Eu (76). Elle possède une surface de 4,8 ha et sa topographie est de plaine, sur une roche mère de craie (Annexe 1). D'après la carte pédologique, la parcelle est principalement située sur des brunisols à néoluvisols. Des EG (silex) sont tout de même présents dès 20 cm de profondeur.

La parcelle 80 était utilisée pour l'exploitation forestière. L'essence principalement présente était le hêtre à 89%. A partir de 2016, plusieurs épisodes de gel intense induisent l'échec de régénération naturelle. Une coupe rase est alors réalisée en 2021. À la suite de la coupe rase, un travail du sol est réalisé sur la parcelle avant plantation de chêne sessile. La date d'installation du site (travaux du sol) s'est faite le 2 octobre 2023. La surface du dispositif installé est de 4,55 ha.



Figure 1 : Plan du dispositif avec l'ensemble des modalités, mis en place sur la parcelle 80 située en forêt indivise d'Eu (76).

L'expérimentation repose sur le principal facteur qui est l'intensité du travail du sol, soit les différents types de préparation mécanisée du site. Ce facteur est constitué de 5 modalités ; VS, TEM, POT, SST, TRP. La PMS de la modalité de travail du sol en plein TRP est réalisée sur toute la surface de l'UE disponible. L'engin utilisé est une mini-pelle de 2,7 tonnes. La PMS de la modalité en potets POT est réalisée sur une surface d'1m<sup>2</sup> autour du point de plantation. L'engin utilisé est une mini-pelle de 2,7 tonnes. La PMS de la modalité de sous-solage en ligne SST est réalisée sur l'axe des lignes de plantation. L'engin utilisé est un tracteur de 9 tonnes. Il n'y a pas de PMS pour la modalité témoin TEM mais il y a plantation. La modalité de végétation spontanée VS n'a pas subi de travail du sol ni de plantation (Fig. 2). Les modalités sont réparties de manière aléatoire et répétées au sein du site, au nombre de 3 répétitions pour la modalité Végétation Spontanée et de 4 répétitions pour les autres modalités. La place limitée n'a pas permis d'intégrer 4 répétitions pour toutes

les modalités. Chaque unité expérimentale (UE) possède une surface de 0.2 ha, excepté pour les UE Végétation Spontanée qui mesurent 0.1 ha.

Modalité	Type d'engin	Type d'outil	Plantation	Surface travaillée
<b>PLE</b> Travail du sol en plein à la dent de sous-solage sur mini-pelle			<input checked="" type="checkbox"/>	
<b>POT</b> Potets à la dent de sous-solage sur mini-pelle			<input checked="" type="checkbox"/>	
<b>SST</b> Ligne continue à la dent de sous-solage sur tracteur			<input checked="" type="checkbox"/>	
<b>TEM</b> Témoin	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<b>VS</b> Végétation spontanée	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figure 2 : Schéma représentant les différentes modalités installées sur le site expérimental et leurs spécificités, *Rozenn Bourquin 2024*

## 2.2. ACQUISITION DES DONNEES

### 2.2.1. LE TEST-BECHE

Le test bêche est une méthode d'évaluation visuelle in situ de la structure du sol, mise au point par Agro-Transfert (Turillon *et al.*, 2018). Il consiste au prélèvement d'un bloc de terre (20 x 20 x 20 cm) à l'aide d'une bêche pour observer le mode d'agencement en mottes. Une fois la motte extraite, elle est ouverte en deux verticalement à l'aide d'un couteau. L'observation est réalisée sur l'intérieur de la motte, non impacté par le coup de bêche. L'analyse est basée sur l'observation de la taille, forme, porosité et interconnectivité des agrégats du sol. Le nombre d'horizons nécessaires à la description de la structure est distingué (entre 1 et 2 le plus fréquemment) et leur épaisseur est relevée. Chacun des horizons est noté selon les classes de structure décrite dans le tableau 1 (Annexe 2). Le test bêche permet d'évaluer la structure selon une échelle de notation de 5 classes, du sol le mieux structuré naturellement au sol le plus compacté. Les traces d'hydromorphie et de structures lamellaires sont également relevées.

### 2.2.2. LE SONDAGE PANDA®

Le sondage PANDA® est une mesure de résistance à la pénétration du sol réalisée à l'aide d'un pénétromètre à énergie variable (PANDA® sol solution). L'appareil mesure l'énergie émise pour chaque coup et la pénétration de la tige dans le sol. La valeur de résistance à la pénétration est l'énergie divisée par l'enfoncement. Cette technique présente l'avantage d'être une mesure peu destructrice à l'échelle d'un site expérimental et de permettre des

mesures indépendantes de l'opérateur (Goutal, 2012). Le pénétrogramme est le graphique obtenu par le pénétromètre. Chaque point du graphique représente un coup de marteau effectué au PANDA®.

Cependant, la valeur de la résistance mécanique du sol dépend fortement de son humidité. C'est pourquoi il est recommandé d'effectuer des mesures d'humidité du sol en parallèle des mesures par pénétrométrie. En l'occurrence dans le cas présent, les mesures sont réalisées sur l'entièreté du site expérimental à un instant  $t$  et ne vont pas être comparées dans le temps. Nous faisons donc le choix de s'affranchir de la mesure de l'humidité puisque nous comparons les points entre eux.

### 2.2.3. L'ECHANTILLONNAGE

Pour établir un diagnostic antérieur à la préparation mécanisée du site, l'échantillonnage doit se faire sur un nombre de points suffisants pour saisir la variabilité de la parcelle. L'échantillonnage pré-PMS (T0) a été réalisé à l'automne 2023. Un test-bêche a été effectué tous les 13 m le long des futurs cloisonnements, afin d'avoir un minimum de 4 répétitions par unité expérimentale. Une des observatrices présente lors de l'échantillonnage pré-PMS était également présente lors de l'échantillonnage post-PMS, afin de se coordonner sur la façon dont la notation est effectuée et ainsi limiter le biais de l'observateur.

Pour établir un bilan postérieur au travail du sol, il est nécessaire d'échantillonner à la fois sur les lignes de plantation ayant été travaillées et sur les zones non travaillées. En se basant sur le même principe, l'échantillonnage post-PMS (T1) de la parcelle est réalisé de manière régulière le long des lignes de plantation. Les points ne sont pas exactement les mêmes que pour le T0, puisque prélever sur les lignes de cloisonnement ne représente pas les modalités de travail du sol. Les transects au T1 ont été choisis le plus proche possible des T0 soit décalés d'environ 5 mètres. L'échantillonnage a été réfléchi de sorte que toutes les unités expérimentales par modalité soient prospectées (Fig. 3). Les points sont espacés de 13 mètres, afin d'avoir un minimum de 4 répétitions par unité expérimentale. Pour les unités expérimentales possédant des zones travaillées et des zones non travaillées (potets et sous-solage), le nombre de points a été doublé afin d'avoir 4 points en zone travaillée et 4 points en dehors de la zone travaillée. Les points relevés en zone non travaillée sont situés à 1 mètre de la ligne de plantation. A chaque point, une mesure de test-bêche et un sondage PANDA® est réalisé. Au total, c'est 107 relevés de test-bêche qui sont réalisés et 107 sondages au pénétromètre.



Figure 3 : Plan du dispositif représenté avec les différentes modalités et les points de mesures par UE de test-bêche et sondage PANDA®

## 2.3. ANALYSE DES DONNEES

Les données brutes du test-bêche et des mesures de pénétrométrie sont nettoyées et analysées à partir du logiciel Rstudio-2024.04.2. Les principales étapes de traitement incluent la pondération des données, la création de graphiques descriptifs, et l'application de tests statistiques. Les résultats du test-bêche sont visualisés sur des cartes à partir du logiciel QGIS pour identifier les variations spatiales des propriétés du sol.

Pour les analyses statistiques, la modalité végétation spontanée (VS) n'a pas été prise en compte. En effet, cette modalité présente peu d'intérêt pour la problématique de ce stage puisque la modalité témoin (TEM) est déjà présente. De plus, elle ne comporte pas assez de points de relevés (seulement 2 par modalités) ni de répétitions d'UE (seulement 3 UE). Intégrer la modalité VS aux analyses statistiques induit donc un plan factoriel déséquilibré, en particulier pour les ANOVA. L'ANOVA suppose des échantillons de taille égale pour chaque combinaison de facteurs afin de pouvoir estimer correctement les variances et effectuer des tests d'hypothèses valides. Un plan déséquilibré peut violer cette hypothèse, ce qui peut rendre les résultats de l'ANOVA non fiables. Les ANOVA se basent donc sur un plan factoriel équilibré, puisque au sein de chaque UE 4 observations sont réalisées, et chaque UE est répétée 4 fois.

Avant les analyses de variance, les données sont testées pour vérifier les hypothèses de normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk), d'indépendance (test de Durbin-Watson) et d'homogénéité des variances (test de Brush-Pagan). Pour les variables qui répondent à ces hypothèses, une analyse de la variance (ANOVA) ainsi que des tests post-hoc de Tukey (HSD) sont réalisés ( $\alpha = 0,05$ ). Pour les comparaisons de moyennes du test-bêche par unité expérimentale, un modèle linéaire est réalisé sur la variable "note de structure" suivi d'une ANOVA.

Pour les comparaisons de moyennes des sondages PANDA®, des modèles linéaires suivi d'ANOVA sont réalisés par variables correspondant à des tranches de 10 cm de profondeur de valeur de résistance à la pénétration. Par tranche de 10 cm, les valeurs des modalités sont transformées en une moyenne qui est ensuite lissée avec les erreurs standards. Un calcul est réalisé avec la fonction « spline » afin de lisser les données (Arrouays et al. 2014. *Advances in Agronomy*).

### 3. RESULTATS

#### 3.1. COMPARAISON DE LA STRUCTURE DU SOL AVANT/APRES PMS SUR LE SITE EXPERIMENTAL

Les cartographies des qualités structurales de chaque point d'échantillonnage permettent d'avoir une vue d'ensemble de l'état structural de la parcelle. Pour les relevés de test-bêche avant PMS, les horizons sont de profondeur fixe (0-10 pour le premier et 10-20 pour le deuxième). En revanche, pour les relevés de test-bêche après PMS les horizons sont de profondeur réelle. Par exemple, le premier horizon noté « Sq2 » possède une profondeur de 6 cm, et l'horizon suivant noté « Sq4 » possède une profondeur de 14 cm. C'est pourquoi sur la figure 4, les points sont représentés de même diamètre, tandis que sur la figure 5 les points sont plus ou moins gros en fonction de l'épaisseur de l'horizon. Indépendamment des travaux du sol, les horizons de surface (horizon 1) sont fréquemment associés à des notes de structure de 1 ou 2, qualifiées comme étant des bonnes structures. Les horizons en profondeur (horizon 2) sont plus fréquemment associés à des notes de structure de 3 ou 4, qualifiées comment étant des structures compactes (Fig. 4 ; Fig. 5).

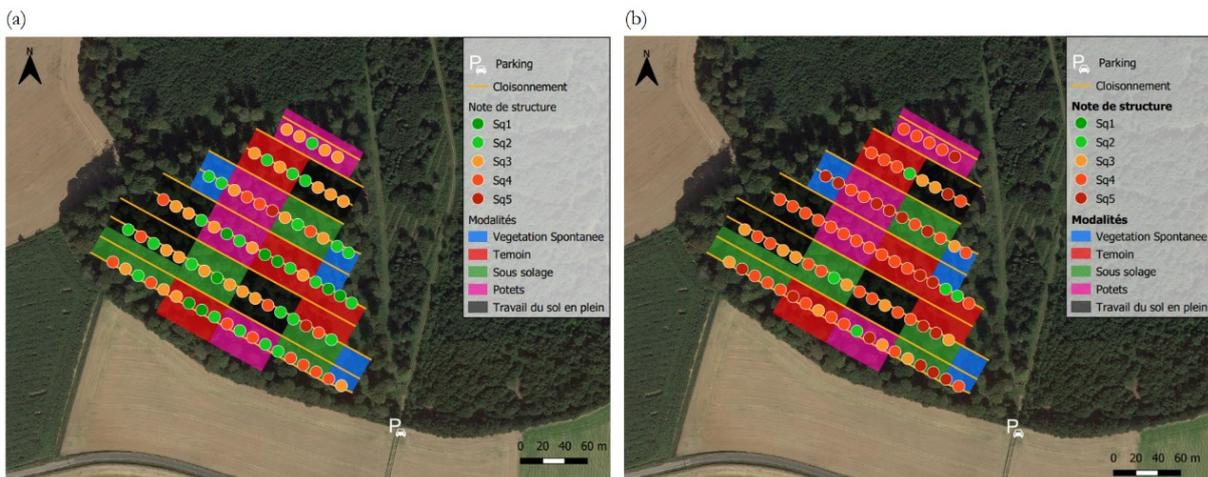


Figure 4 – Cartographie de l'état structural du sol avant travaux de PMS sur l'horizon 1 (a) et l'horizon 2 (b)



Figure 5 – Cartographie de l'état structural du sol après travaux de PMS sur l'horizon 1 (a) et l'horizon 2 (b)

L'analyse des comparaisons de moyennes des test-bêches se base sur la note moyenne par point des deux horizons, pondérée par l'épaisseur de chaque horizon. La comparaison des notes moyennes de test-bêche des modalités avant PMS montre qu'aucune des modalités n'est différente ( $p$ -value = 0.1965). Le site expérimental est donc homogène. La comparaison des notes moyennes de test-bêche entre les modalités témoin avant PMS et après PMS montre également qu'elles ne diffèrent pas significativement ( $p$ -value = 0.2852). Il n'y a donc pas de biais d'observateur, puisque les notations des UE témoin sont restées bel et bien identiques après les travaux du sol. En revanche, l'état structural des autres parcelles est ressorti comme différent significativement ( $p$ -value = 0.0054) entre avant et après PMS, signifiant que le travail du sol a bien un effet sur la structure de celui-ci. Les notes sont plus faibles après travail du sol (moyenne globale de structure de 2.79), par rapport à avant travail du sol (moyenne globale de structure de 3.32). Les notes de structure sont donc meilleures après travail du sol. La modalité sous-solage ressort particulièrement, puisque la moyenne des notations est significativement différente après PMS par rapport à avant PMS ( $p$ -value = 0.0230).

## 3.2. RESULTATS DE L'ÉVALUATION DES MODALITÉS DE PMS PAR TEST-BÊCHE

### 3.2.1. FREQUENCE DES NOTES DE STRUCTURE PAR MODALITE

Pour les modalités possédant des observations en zone travaillée et zone non travaillée, les analyses discutées dans ce paragraphe se basent principalement sur les données des zones travaillées. Lorsque la zone non travaillée est prise en compte, elle est signalée.

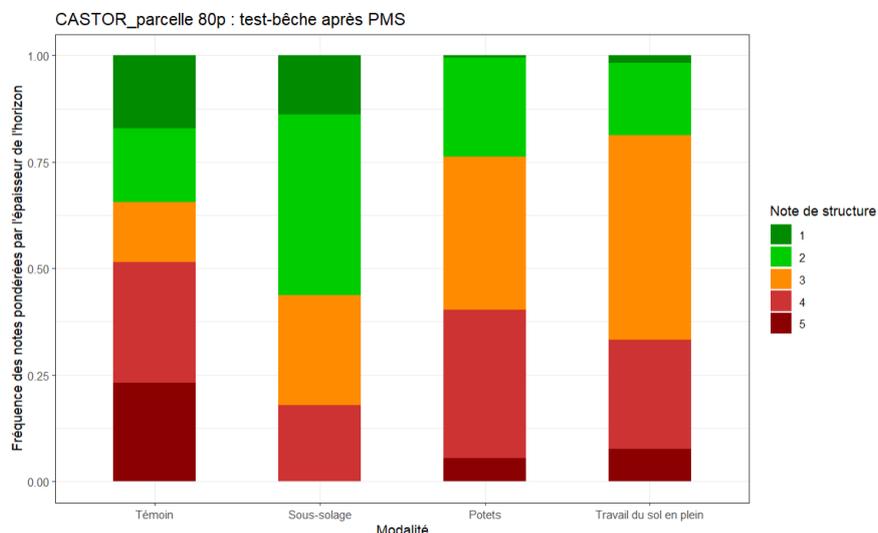


Figure 6 – Proportion pondérée des notes de structure du sol en fonction des modalités

La figure 6 montre la fréquence des notes de structure pour les différentes modalités ; TEM, SST, POT, TRP. Les différentes couleurs représentent des notes de structure de 1 à 5. La modalité SST présente la plus forte proportion de note 2, et la modalité TEM présente la plus forte proportion de note 5. Le TRP et POT sont représentés par une proportion importante de note 3 et 4.

### 3.2.2. NOTE MOYENNE DE L'ETAT STRUCTURAL PAR MODALITE

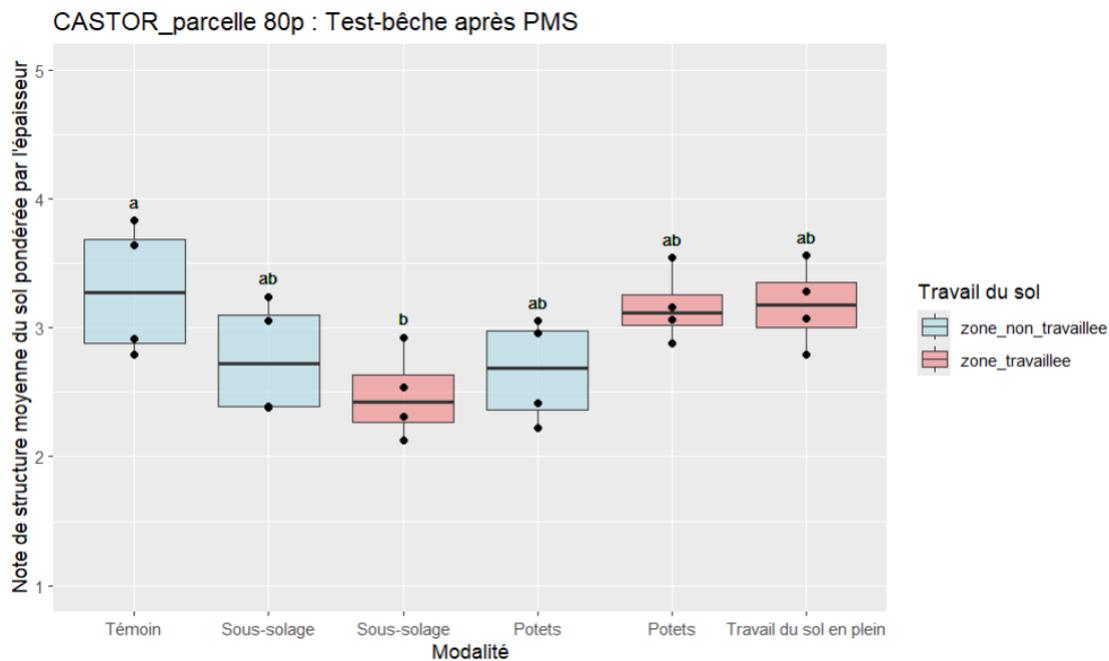


Figure 7 – Moyennes des notes de structure en fonction des modalités de travail du sol

L'étude de la note moyenne de l'état structural par modalité révèle une différence significative uniquement entre la modalité TEM et la modalité SST ( $p$ -value = 0.0433). Les autres modalités ne sont pas différentes au seuil de significativité de 5%. Des tendances peuvent tout de même être observées, notamment pour les modalités possédant à la fois une zone travaillée et une zone non travaillée. Pour le sous-solage, la note structurale moyenne de la zone travaillée est plus faible par rapport à la zone non travaillée. Cela signifie une diminution de la proportion de mauvaise structure au sein des bêchées. Pour les potets en revanche, la note structurale moyenne de la zone travaillée est plus élevée, ce qui signifie une augmentation de la quantité de mauvaise structure par rapport à la zone non travaillée. Au niveau du type de travail du sol, le travail du sol en plein et les potets (zone travaillée) ont des moyennes de note du sol très similaires.

### 3.2.3. PROPORTION DE STRUCTURE « BONNE », « MOYENNE » ET « COMPACTE » PAR MODALITE

Pour l'étude de la proportion des notes de structure réparties selon les modalités (Fig. 8), un regroupement est réalisé afin de simplifier les analyses statistiques. Les notes de structure 1 et 2 sont regroupées en note de « bonne structure », les notes de structure 3 sont qualifiées de « structure moyenne » et les notes de structure 4 et 5 sont regroupées en note de « structure compacte ».

La proportion de notes de « bonne structure » est significativement différente entre SST et TRP ( $p$ -value = 0.0426). Nous pouvons observer que la plus grande proportion de notes de « bonne structure » se trouve dans les modalités TEM et SST. Les modalités POT et TRP sont celles qui possèdent le moins de « bonne structure ».

En revanche, il n'y a aucune différence de moyennes entre les notes de « structure moyenne » ( $p$ -value = 0.193) par modalités. Des tendances peuvent tout de même être

observées, puisque la proportion de note de « structure moyenne » augmente progressivement avec l'intensité de travail du sol. C'est dans les zones de POT et TRP qu'il y a la plus grande proportion de « structure moyenne ».

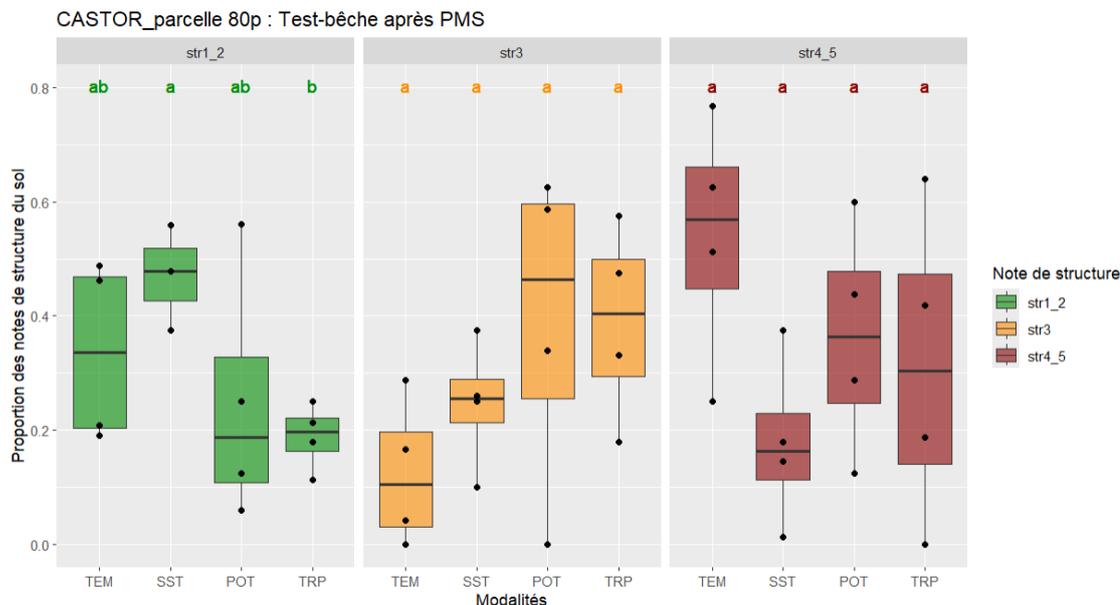


Figure 8 – Proportion des notes de structure « bonne », « moyenne » et « compacte » en fonction des modalités de travail du sol

Il n'y a aucune différence non plus entre les notes de « structure compacte » ( $p$ -value = 0.1861) par modalités. La plus grande proportion de « structure compacte » est quant à elle dans la modalité TEM. Des proportions plus importantes de « structure compacte » sont observées dans les zones non travaillées (TEM) par rapport aux zones travaillées (SST, POT, TRP), néanmoins ce ne sont que des tendances puisque cette comparaison n'est pas significative au seuil de 5% ( $p$ -value = 0.0580). Des tendances peuvent être ressorties, puisque le sous-solage comporte une proportion de « structure compacte » plus faible par rapport aux deux autres types de travail du sol. Les proportions de « structure compacte » des POT et du TRP sont très similaires.

### 3.2.4. PROPORTION DE STRUCTURE LAMELLAIRE PAR MODALITE

La proportion de structure lamellaire ne diffère pas significativement en fonction des modalités ( $p$ -value = 0.4754). En revanche des tendances se distinguent, puisque les UE TEM en possèdent la plus grande quantité avec une moyenne de 0.38, tandis que les UE SST en possèdent le moins avec une moyenne de 0.09. La proportion de structure lamellaire pour les modalités POT et TRP sont semblables, et assez élevées (Fig. 9).

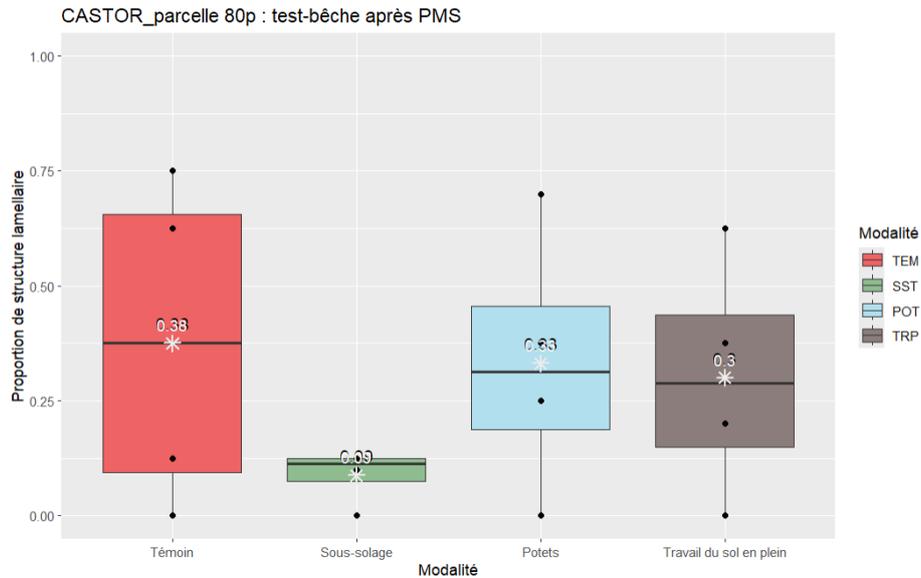


Figure 9 – Proportion de structures lamellaires en fonction des modalités de PMS. Les étoiles blanches représentent les moyennes de chaque modalité.

### 3.3. EFFETS DES MODALITES DE PMS AVEC LE PANDA®

Les résultats des sondages au pénétromètre sont visualisés dans un graphique qui montre la résistance à la pénétration (en MPa) en fonction de la profondeur (en cm) (Fig. 10). Il présente plusieurs courbes représentant les différentes modalités (POT, SST, TEM, TRP). La zone colorée autour de chaque courbe représente l'erreur standard. Toutes les modalités montrent une tendance à l'augmentation de la résistance à la pénétration à partir de 40 cm de profondeur. La modalité TEM présente la plus grande résistance maximale parmi les modalités, tandis que SST présente la résistance à la pénétration la plus faible et la plus stable.

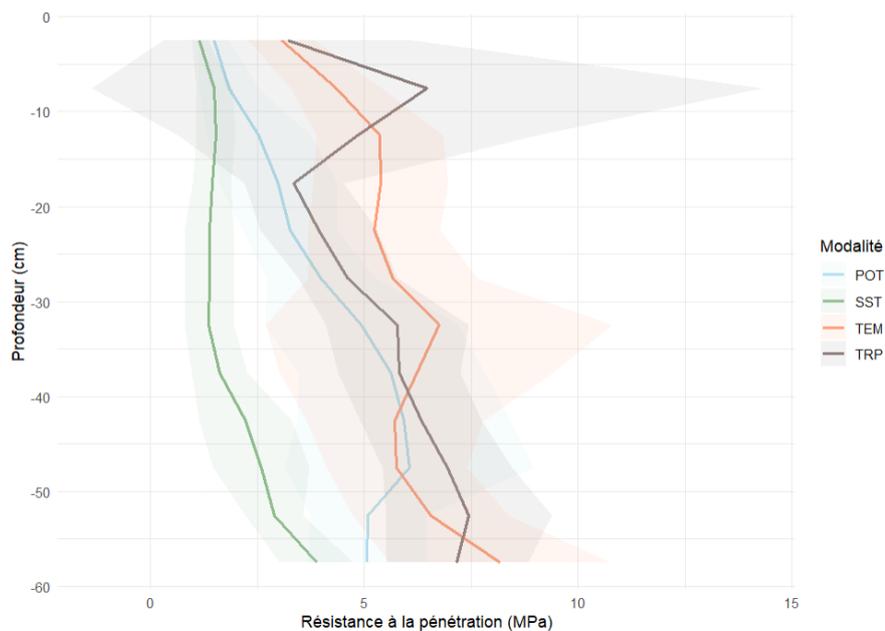


Figure 10 – Résistance à la pénétration du sol selon les modalités de PMS en fonction de la profondeur

L'analyse des moyennes de résistance à la pénétration du sol est effectuée par tranche de 10 cm de profondeur. La différence de moyenne entre modalités par profondeur est décrite dans le Tableau 1. Des lettres différentes signifient des moyennes significativement différentes, deux lettres identiques signifient deux moyennes significativement non différentes.

Pour la couche de surface de 0 à 10 cm, toutes les modalités présentent des valeurs similaires de résistance à la pénétration ( $p$ -value = 0.2869). Entre 10 et 20 cm, deux modalités se distinguent : la valeur de résistance à la pénétration du SST est significativement différente du TEM ( $p$ -value = 0.0338). Entre 20 et 40 cm, la modalité SST se distingue de toute les autres modalités ( $p$ -value = 0.0066 et  $p$ -value = 0.0360). Les modalités TEM, POT et TRP sont quant à elles statistiquement similaires. Pour les couches les plus profondes, soit entre 40-50 cm puis 50-60 cm, aucune des modalités ne présente des valeurs de résistance à la pénétration différente (respectivement  $p$ -value = 0.1134,  $p$ -value = 0.1118).

Modalité	Profondeur					
	p0-10	p10-20	p20-30	p30-40	p40-50	p50-60
TEM	a	a	a	a	a	a
SST	a	b	b	b	a	a
POT	a	ab	a	a	a	a
TRP	a	ab	a	a	a	a

Tableau 1 – Seuils de significativité des valeurs de résistance à la pénétration pour chaque modalité de PMS selon la profondeur du sol



## 4. DISCUSSION

Le site expérimental étant initialement fortement compacté, la réalisation de différents travaux de PMS a permis une amélioration de la structure globale du site. En revanche, ce résultat est à nuancer en fonction du type de PMS utilisé.

### 4.1. EFFETS DES MODALITES POT ET TRP SUR LA STRUCTURE DU SOL

Les modalités de PMS POT et TRP ont des rendus au niveau de la structure du sol très similaires. Les pratiques de décompactage et de mélange des couches superficielles du sol induisent une homogénéisation de la structure en une note considérée comme « moyenne ». Le retournement implique que des couches notées « bonne structure » normalement situées en surface se retrouvent en profondeur, tandis que des couches plus profondes notées comme étant de « mauvaise structure » se retrouvent en surface. Plus globalement, le mélange des horizons de surface et de profondeur crée une majorité de couche de sol noté « structure moyenne » (Fig. 6 ; Fig. 8). Pour ces mêmes modalités au niveau de la résistance à la pénétration du sol, celle-ci ne diffère pas significativement du TEM.

La même chose se produit au niveau de la quantité de structure lamellaire (Fig. 9). En moyenne, il y a autant de structures lamellaires dans le TEM que dans les deux modalités POT et TRP. Cela peut être dû au fait que les couches de sol compactés ne sont pas réellement décompactées, mais seulement ramenées en surface ou mélangées avec différentes couches. C'est pourquoi les structures lamellaires sont toujours présentes, et la résistance à la pénétration n'est pas significativement diminuée. Ces deux modalités sont donc celles qui ont l'effet de perturbation le plus important au niveau de la structure du sol, pour un résultat qui n'est pas de meilleure qualité que le TEM. Une différence majeure est tout de même relevée entre ces deux modalités, puisque le TRP est travaillé sur toute la parcelle, tandis que le POT est travaillé uniquement autour du point de plantation. Une grande partie de l'UE n'est donc pas touchée par le retournement et le mélange des couches du sol.

Le travail profond, en retournant le sol a pour effet de modifier la distribution de la matière organique et de la texture (Cote et Dupuis, 1980). Les modifications physiques apportées par le travail du sol profond persistent après plus de 3 ans (Cote et Dupuis, 1980). De plus, le travail du sol peut entraîner des pertes plus élevées d'éléments nutritifs en raison de l'érosion accrue (Kisic *et al.*, 2018). La répartition des éléments nutritifs du sol devient inégale, ce qui entraîne souvent une baisse de la fertilité dans les zones érodées. En revanche, en termes de survie et croissance des plants le TRP serait une méthode de PMS intéressante. L'inversion des horizons du sol semble être associé à des taux de survie plus élevés que la réalisation de sillons (Sikström *et al.*, 2020). Il ameublir le sol et permet ainsi une meilleure installation des plants dès la première année en facilitant la prospection racinaire et l'alimentation hydrique (Ulrich *et al.*, 2013). Le TRP permettrait donc d'avoir les meilleurs taux de survie de croissance des plants à court terme. La méthode de PMS de TRP possède donc des avantages et des inconvénients, et faire le choix de cette technique est faire le choix de compromettre l'état physique d'un sol pour un potentiel meilleur rendement de croissance des plants. Ce résultat est tout de même à nuancer avec le mode de régénération, comme le montre l'étude d'Aleksandrowicz-Trzcińska. Quand il y a plantation, un travail du sol intensif n'est pas nécessaire. En cas de régénération naturelle ou de semis direct, peut être que le TRP aurait été pertinent. Les méthodes qui minimisent

la perturbation du sol peuvent également offrir des avantages significatifs en termes de croissance et de survie des semis (Aleksandrowicz-Trzcińska *et al.*, 2017).

## 4.2. EFFETS DE LA PRATIQUE DU SST SUR LA QUALITE DU SOL

La réduction du travail du sol et les pratiques sans labour sont plus bénéfiques pour maintenir la qualité du sol et réduire l'érosion que le travail du sol en plein. Ces méthodes aident à préserver la structure du sol, la matière organique et les niveaux de nutriments, favorisant ainsi une meilleure santé et durabilité du sol (Kisic *et al.*, 2018). Cette étude fait lien avec nos résultats, puisque la modalité SST est celle qui ressort le plus au niveau des effets positifs sur la structure du sol. Sa note de structure moyenne est significativement diminuée par rapport au TEM (Fig. 7). La modalité SST comporte autant de proportion de « bonne structure » que le TEM, et beaucoup moins de proportion de « mauvaise structure » que le TEM et les deux autres modalités de travail du sol POT et TRP. De plus, la quantité de structure lamellaire est fortement diminuée dans la modalité SST, en comparaison au TEM, POT et TRP. Le sous-solage entraîne donc une réelle décompaction des couches les plus tassées, et permet d'amoinrir les structures lamellaires à l'endroit où le sillon est formé. Les travaux de sous-solage constituent un procédé efficace pour améliorer les sols tassés (Rotaru, 1985), facilitant la pénétration de l'eau en profondeur sans que cela ramène en surface les horizons profonds à mauvaise structure. Le sous-solage ne modifie pas les propriétés physiques du sol dans son ensemble (Cote et Dupuis, 1980), mais seulement une tranche de sol, tout au plus 10 cm de large sur une profondeur de 50cm, de chaque côté du sillon. De plus, il a été démontré que le sous-solage induit un meilleur développement des racines par rapport au labour (Celma *et al.*, 2019). Les jeunes plants montrent une meilleure pénétration et un ancrage plus profond des racines dans les sols préparés par SST, comparé au TRP. En revanche, étant donné que le tracteur de SST parcourt chaque ligne de plantation, la question d'une aggravation du tassement en dehors de la largeur travaillée se pose. De plus, l'écartement recommandé entre les lignes de plantation est de 2 mètres afin de ne pas rouler sur le sol travaillé de la ligne précédente.

## 4.3. INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES ET PEDOLOGIQUES SUR LA STRUCTURE DU SOL

Ces résultats doivent être considérés avec réserve et sont à nuancer. En effet, des facteurs extérieurs jouent également un rôle sur la structure du sol. Un premier facteur important qui joue sur la qualité structurale d'un sol est le taux d'humidité. Il a été démontré qu'en période humide, la PMS induit des impacts plus marqués sur la structure du sol par rapport à une période sèche (Collet *et al.*, 2024). Dans des conditions trop humides, le passage de l'outil peut créer des lissages importants. À l'inverse, en conditions trop sèches, la préparation peut créer des mottes non cohésives avec de nombreux vides. Dans ces deux cas, des aggravations de la situation initiale peuvent apparaître. L'efficacité de la PMS dépend alors fortement des conditions d'humidité du sol au moment de l'intervention. Un deuxième facteur important qui joue également sur la qualité structurale d'un sol est le contexte pédologique. Un outil peut avoir des impacts très différents suivant le type de sol rencontré. Par exemple, les limons et les argiles peuvent se lisser sous l'effet de la pression exercée par l'outil. Ainsi, la teneur en eau du sol combinée à sa composition granulométrique, influence grandement sa structure. Sur un autre type de sol avec un taux d'humidité différent, les résultats pourraient varier considérablement. C'est pourquoi il

serait intéressant d'inscrire cette étude dans un modèle plus large, comportant plusieurs sites expérimentaux avec des proportions variées de sable, limon et argile, afin de comparer les effets de PMS en fonction de différents contextes pédologiques.

Pour finir, une première voie pour diminuer les impacts de la PMS sur la structure du sol est donc de limiter la surface réellement travaillée avec les outils, en réalisant une PMS intermittente au lieu d'une PMS en plein sur la parcelle (Löf *et al.*, 2012). La PMS intermittente laisse des zones intactes entre les zones préparées pour la plantation, plus ou moins larges selon la méthode employée. Les zones préparées peuvent prendre la forme de bandes (SST) ou de petits potets (POT). Une deuxième voie pour diminuer les impacts des interventions est de limiter le nombre d'interventions réalisées sur le site, en combinant en un nombre réduit d'opérations les différentes interventions prévues de façon successive. Combiner ainsi différents outils de PMS sur un même tracteur permet de n'effectuer qu'un seul passage et de réduire l'impact secondaire dû au porte-outil (Collet *et al.*, 2016).

Pouvoir évaluer la structure du sol est essentiel à la prise de décision concernant le choix de la préparation mécanisée du sol dans les chantiers de plantation. Ce diagnostic est destiné aux divers acteurs de la gestion forestière étant amenés à prendre des décisions lors des opérations sylvicoles. Il permet d'apporter une réponse aux questions suivantes : L'état structural du sol d'une parcelle avant plantation nécessite-t-il une préparation mécanisée ? La préparation du sol effectuée a-t-elle été efficace sur l'état structural du sol ? Le test bêche utilisé lors de la caractérisation des sols a permis de réaliser un diagnostic de la structure du sol dans ses horizons superficiels (20 cm). C'est une méthode rapide et assez peu destructive. En revanche, la méthode du test bêche nous permet uniquement de décrire les premiers horizons du sol. On peut noter l'intérêt de la méthode comme outil de prise de décision en fonction des observations réalisées, pour réaliser ou non une PMS et par conséquent de réduire les impacts économiques et environnementaux sur les parcelles. Le pénétromètre PANDA® reste alors une façon rapide et non destructive de mesurer la compaction de sols même en profondeur. Elle est sensible à la structure et à l'humidité du sol mais aussi à la présence d'éléments grossiers qui peuvent perturber le signal. Ces constats soulignent la nécessité de bien connaître les impacts potentiels des méthodes de PMS et, pour chaque chantier de plantation, de réaliser un diagnostic permettant de décider de l'opportunité d'une PMS et de choisir la méthode la plus adaptée.

## 5. CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence l'effet significatif de modalités de PMS sur les propriétés physiques des sols forestiers. Les résultats montrent que les techniques engendrant peu de perturbations telles que le sous-solage tracté (SST) améliorent la qualité structurale du sol à l'endroit travaillé. À l'inverse, le travail du sol en plein (TRP) et les potets (POT) n'ont pas montré d'effets positifs sur la structure des sols. Ces conclusions soulignent l'importance de choisir des techniques de PMS adaptées à chaque cas de terrain spécifique, qui permettrait de minimiser les perturbations du sol et maximiser les conditions de croissance des plants.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour les recherches futures sur les pratiques de gestion forestière durable. Un chemin intéressant pourrait consister à explorer les impacts à long terme des différentes modalités de PMS sur la biodiversité du sol et sur les interactions entre le sol et les plantes. En outre, il serait pertinent d'examiner l'efficacité de ces techniques dans différents types de sols et sous divers climats pour générer des recommandations spécifiques adaptées à divers contextes écologiques.

## 6. REFERENCES

- Aleksandrowicz-Trzcińska M., Drozdowski S., Wolczyk Z., Bielak K., et Żybura H. 2017. Effects of Reforestation and Site Preparation Methods on Early Growth and Survival of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in South-Eastern Poland. *Forests*, 8(11), p. 421. DOI : 10.3390/f8110421
- Bengough A.G. et Mullins C.E. 1991. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant and Soil*, 131(1), p. 59-66. DOI : 10.1007/BF00010420
- Carling P.A., Irvine B.J., Hill A., et Wood M. 2001. Reducing sediment inputs to Scottish streams: a review of the efficacy of soil conservation practices in upland forestry. *Science of The Total Environment*, 265(1-3), p. 209-227. DOI : 10.1016/S0048-9697(00)00660-4
- Celma S., Blate K., Lazdiņa D., Dūmiņš K., Neimane S., Štāls T.A., et Štikāne K. 2019. Effect of soil preparation method on root development of *P. sylvestris* and *P. abies* saplings in commercial forest stands. *New Forests*, 50(2), p. 283-290. DOI : 10.1007/s11056-018-9654-4
- Collet C., Agro C., Akroume E., Puyal M., et Vast F. 2024. *Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size*. Disponible sur : <https://www.researchsquare.com/article/rs-4480823/v1>.
- Collet C., Richter C., Ulrich E., Blondet M., Deleuze C., Boulanger V., Dassot M., et Legay M. 2016. Une approche multiacteur et multidisciplinaire pour innover dans les pratiques de plantation forestière. *Revue Forestière Française*, (6), p. 533. DOI : 10.4267/2042/62400
- Cote D. et Dupuis G. 1980. Effets du sous-solage et du labour profond sur les propriétés physiques du sol et le rendement de la luzerne et du maïs sur loam sableux chaloupe. *Canadian Journal of Soil Science*, 60(2), p. 345-353. DOI : 10.4141/cjss80-037
- Dassot M., Frauenfelder A., Wehrlen L., et Collet C. 2017. La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent de lever des blocages de régénération naturelle.
- Goutal N. 2012. Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation.
- © IGN 2017. Inventaire forestier. La forêt plantée en France : état des lieux.
- © IGN 2023. Inventaire forestier national. Mémento 2023.
- Kees G. 2008. Using Subsoiling To Reduce Soil Compaction.
- Kisic I., Bogunovic I., Zgorelec Z., et Bilandzija D. 2018. Effects of soil erosion by water under different tillage treatments on distribution of soil chemical parameters. *Soil and Water Research*, 13(1), p. 36-43. DOI : 10.17221/25/2017-SWR
- Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., et Jacobs D.F. 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 43(5-6), p. 825-848. DOI : 10.1007/s11056-012-9332-x
- Pousse N., Bonnaud P., Legout A., Darboux F., et Ranger J. 2022. Forest soil penetration resistance following heavy traffic: A 10-year field study. *Soil Use and Management*, 38(1), p. 815-835. DOI : 10.1111/sum.12730

- Prévost M. 1992. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec. *Ann Sci For*, 49, 277-296.
- Ranger J., Legout A., Bonnaud P., Arrouays D., Nourrisson G., Gelhaye D., et Pousse N. 2020. Interactions entre les effets du tassement par les engins d'exploitation et la fertilité chimique des sols forestiers. *Revue forestière française*, 72(3), p. 191-213. DOI : 10.20870/revforfr.2020.5320
- Roger-Estrade J.J., Labreuche J., et Boizard H.H. [s d]. Importance du travail du sol: typologie des modes de mise en œuvre et effet sur le rendement des cultures.
- Rotaru C. 1985. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. *Revue Forestière Française*, (5), p. 359. DOI : 10.4267/2042/21823
- SDES. 2021. Bilan environnemental de la France - Édition 2021.
- Sikström U., Hjelm K., Holt Hanssen K., Saksa T., et Wallertz K. 2020. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 54(2).
- Turillon C., Créatin V., Tomis V., Duparque A., 2018, Guide méthodique du test bêche Structure et Action des vers de terre. AGRO TRANSFERT RESSOURCES et TERRITOIRES. 16 p
- Tyree M.C., Seiler J.R., Aust W.M., Sampson D.A., et Fox T.R. 2006. Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO<sub>2</sub> efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain. *Forest Ecology and Management*, 234(1-3), p. 363-369. DOI : 10.1016/j.foreco.2006.07.021
- Ulrich E., Becker C., Franco J.-p., 2013 : Délimitation du champ de travail optimal du Culti3B. Synthèse machine et résultats du travail du sol du projet R&D ONF/grenier-Franco/C. Becker -2012/13. rapport ONF, 6.
- Vast F., Collet C.C., Köller R., Pousse N., et Richter C. (2020). Le profil cultural: une méthode d'observation pour analyser les impacts de la préparation mécanisée du site sur la structure du sol.
- Vennetier M. 2012. Changement climatique et dépérissements forestiers: causes et conséquences. *Changement climatique et modification forestière*, CNRS, p. 50 - p. 60, 2012. hal-00756083

## 7. LISTE DES ABREVIATIONS

EG	Eléments grossiers
MPa	MégaPascal
ONF	Office National des Forêts
PMS	Préparation Mécanisée du Site
POT	Potets
RDI	Recherche, Développement et Innovation
SST	Sous-Solage Tracté
TEM	Témoin
TRP	Travail du sol en Plein
UE	Unité Expérimentale
VS	Végétation Spontanée



## 8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Seuils de significativité des valeurs de résistance à la pénétration pour chaque modalité de PMS selon la profondeur du sol ..... 19



## 9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Plan du dispositif avec l'ensemble des modalités, mis en place sur la parcelle 80 située en forêt indivise d'Eu (76) .....	10
Figure 2 : Schéma représentant les différentes modalités installées sur le site expérimental et leurs spécificités, <i>Rozenn Bourquin 2024</i> .....	11
Figure 3 : Plan du dispositif représenté avec les différentes modalités et les points de mesures par UE de test-bêche et sondage PANDA®.....	12
Figure 4 - Cartographie de l'état structural du sol avant travaux de PMS sur l'horizon 1 (a) et l'horizon 2 (b) .....	14
Figure 5 - Cartographie de l'état structural du sol après travaux de PMS sur l'horizon 1 (a) et l'horizon 2 (b) .....	14
Figure 6 - Proportion pondérée des notes de structure du sol en fonction des modalités.....	15
Figure 7 - Moyennes des notes de structure en fonction des modalités de travail du sol .....	16
Figure 8 - Proportion des notes de structure « bonne », « moyenne » et « mauvaise » en fonction des modalités de travail du sol .....	17
Figure 9 - Proportion de structures lamellaires en fonction des modalités de PMS.....	18
Figure 10 - Résistance à la pénétration du sol selon les modalités de PMS en fonction de la profondeur .....	18

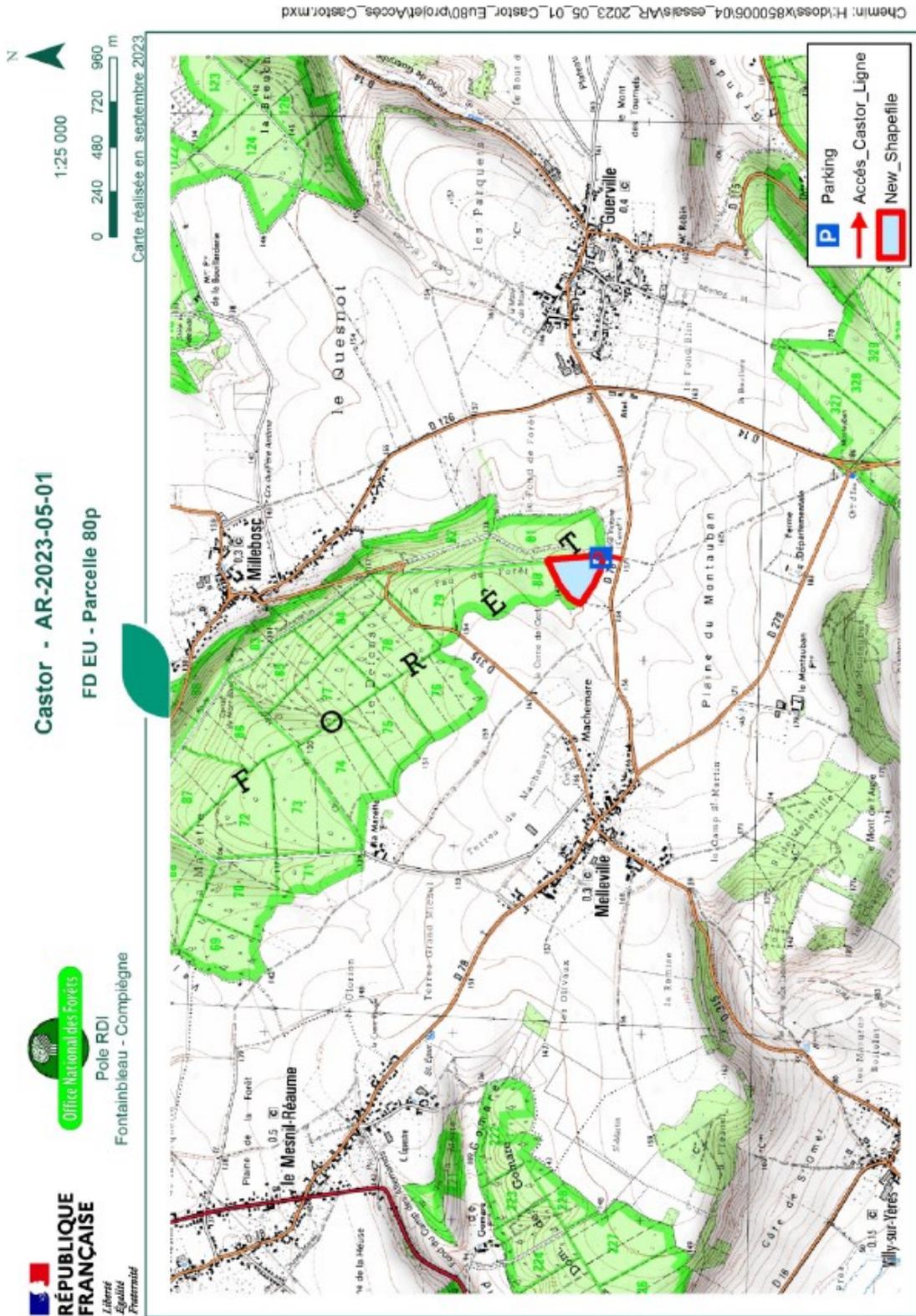


## 10. ANNEXES

### TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : CARTE DE LOCALISATION DU DISPOSITIF ET DE LA PARCELLE 80 EN FORET DOMANIALE INDIVISE D'EU .....	34
ANNEXE 2 : CLE DE DETERMINATION DE LA NOTE DE STRUCTURE DU SOL .....	35

# ANNEXE 1 : CARTE DE LOCALISATION DU DISPOSITIF ET DE LA PARCELLE 80 EN FORET DOMANIALE INDIVISE D'EU



ChemIn: H:\doss\w850006\04\_essai\AR\_2023\_05\_01\_Castor\_Eu0\projet\Accès\_Castor.mxd

## ANNEXE 2 : CLE DE DETERMINATION DE LA NOTE DE STRUCTURE DU SOL

Qualité de la structure	Apparence générale	Taille	Racines	Porosité visible	Apparence après extraction	Traits distinctifs	Apparence des agrégats ou fragments de ~ 1.5 cm de diamètre
<b>Sq5 Très compact</b> Très difficile de briser les mottes fermées avec les mains	Principalement mottes fermées angulaires	Mottes angulaires > 10 cm, très peu de taille < 7 cm	Pas ou peu de racines à l'intérieur des fragments. Les racines présentes sont concentrées autour des mottes fermées	Très peu de « pores visibles grossiers » et de fissures. Anoxie possible		 Couleur gris bleu possible	 Le sol peut être fragmenté quand le sol est humide, mais peut exiger un effort important. Habituellement pas de pores ou fissures visibles à l'œil
<b>Sq4 Compact</b> Assez difficile de briser les mottes fermées avec une seule main	Principalement mottes fermées subangulaires	Moins de 30 % des mottes sont de taille < 7 cm; structure lamellaire possible	Mottes fermées dans les « pores grossiers visibles » et les fissures	Peu de « pores grossiers visibles » et peu de fissures		 Racines dans les pores grossiers visibles	 Ces fragments de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide
<b>Sq3 Ferme</b> La plupart des agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Présence possible de mottes fermées	Mélange d'agrégats de 2 mm-10 cm. Moins de 30 % < 1 cm		Présence possible de pores grossiers visibles et de fentes de retrait		 Faible porosité des agrégats	 Agrégats avec peu de pores visibles et plutôt arrondis
<b>Sq2 Intact</b> Agrégats se désagrègent facilement entre les doigts	Pas de motte fermée	Mélange d'agrégats arrondis de 2 mm à 7 cm	Les racines colonisent l'ensemble du bloc ; les racines sont bien présentes à l'intérieur et autour des agrégats	La plupart des agrégats sont poreux		 Forte porosité des agrégats	 Agrégats arrondis, fragiles, poreux qui se cassent facilement
<b>Sq1 Friable</b> Agrégats se désagrègent très facilement entre les doigts		La plupart des agrégats < à 0.6 cm			Très poreux		 Agrégats fins et poreux