

Evaluation de l'exposition des planteurs
aux risques de Troubles Musculo-Squelettiques lors de la plantation en forêt,
et modulation par la Préparation Mécanisée du Site et le type de plants

Malaurie Puyal, Marine Boudy, Catherine Collet, Lindsay Godard, Florian Vast, Luce Martin,
Chloé Agro

Février 2025

Ce travail a été réalisé dans le cadre des projets

- **FOREST FOR GOOD**
- **RENFOR**

Il a été réalisé avec le soutien financier de :

- **Groupe AXA, avec la contribution d'AXA IM**
- **Ministère en charge des forêts**

Affiliation des auteurs :

- Malaurie Puyal, Département Recherche, Développement et innovation, ONF, 60200 Compiègne, malaurie.puyal@onf.fr
- Marine Boudy, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux
- Catherine Collet, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux , catherine.collet@inrae.fr
- Lindsay Godard, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux
- Florian Vast, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux
- Luce Martin, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux
- Chloé Agro, Pôle RENFOR, UMR Silva, INRAE, 54 280 Champenoux

Pour citer ce document :

Puyal M., Boudy M., Collet C., Godard L., Vast F., Martin L., Agro C., 2025. Evaluation de l'exposition des planteurs aux risques de Troubles Musculo-Squelettiques lors de la plantation en forêt, et modulation par la Préparation Mécanisée du Site et le type de plant. Rapport Interne, ONF, 24 p.

1. Introduction

L'acte de plantation est identifié par les caisses d'assurance maladie comme une activité pénible, avec des risques accrus d'apparition de troubles musculosquelettiques (TMS). Les exigences physiques du travail telles que le port de charges lourdes, les postures contraignantes et les mouvements répétitifs ou intenses en sont les contributeurs majeurs (Granzow et al., 2016 ; Slot et al., 2010). Différents paramètres peuvent influencer la pénibilité de la plantation : des paramètres liés au planteur (la taille du planteur, son âge, son historique et ses habitudes de travail), d'autres liés à son outil (type d'outil, adaptation de l'outil à la personne) ou encore à l'environnement de la plantation (pente du terrain, nature et état du sol, encombrement de la parcelle, conditions météorologiques...). Selon le contexte de plantation, l'ergonomie du travail sera différente : une plantation sur un terrain avec de nombreux rémanents aura une moins bonne ergonomie qu'une plantation sur une zone nettoyée avec des chemins propres ; un chantier de plantation où les planteurs utilisent des cannes à planter permettra des postures plus ergonomiques que des chantiers où les planteurs utilisent des pioches à planter (Puyal et al., 2022 ; Colney et al., 2020).

La préparation mécanisée du site (PMS) avant plantation est une méthode pratiquée dans de nombreux chantiers de plantation pour favoriser la reprise et l'installation des plants. Selon ses modalités d'application, elle peut modifier l'état du sol, la végétation en place et l'encombrement des parcelles et, par-là, modifier l'environnement du planteur. Par ailleurs, en France, de nombreuses essences sont installées en plantation et différents types de plant peuvent être utilisés selon l'essence plantée : dimension des plants, conditionnement des plants (en godet ou racines nues) différent. La manutention des plants, et donc la pénibilité du travail du planteur peuvent différer selon le type de plant.

Cette étude a pour objectif de comprendre dans quelle mesure l'environnement de la plantation, et notamment le type de PMS préalable à la plantation et le type de plant, influencent l'ergonomie du planteur.

Pour cette étude, la méthode RULA (Rapid Upper Limb Assessment, en français : Evaluation rapide des membres supérieurs) a été utilisée pour analyser les postures des planteurs (McAtamney and Corlett, 1993). C'est une méthode de référence utilisée depuis plus de 25 ans dans de nombreux secteurs d'activités (éducation, agriculture, construction, ...) et pays (Gómez-Galán et al., 2020). Cette méthode ne nécessite aucun équipement particulier pour son application et permet une évaluation rapide de la pénibilité des actions pour les parties supérieures du corps (tronc, épaules, nuque, poignets, coudes). Elle prend en compte les angles entre les parties du corps, les charges déplacées et la répétitivité des mouvements. Cette méthode permet une catégorisation de l'activité en 4 niveaux de risque de blessure dû à la charge musculosquelettique, présenté dans le Tableau 1 (McAtamney and Corlett, 1993).

Tableau 1 : Présentation des niveaux de risque RULA

Niveau de risque	Description	Mesures correctives possibles	Couleur
Négligeable	Postures de travail qui se situent en limite des amplitudes de mouvement appropriées telles que définies dans la littérature, sans présence d'actions répétitives, charge statique ou l'exercice d'une force.	Niveau acceptable si la position n'est pas maintenue ou répétées pendant de longues périodes	Vert
Faible	Postures de travail qui se situent en dehors des amplitudes de mouvement appropriées ou des postures qui se situent dans des amplitudes de mouvement appropriées mais où des actions répétitives, une charge statique ou l'exercice d'une force sont nécessaires.	Une analyse plus poussée est à prévoir pour comprendre les zones à risques. Des changements peuvent être nécessaires.	Jaune

<i>Moyen</i>	Postures de travail qui ne correspondent pas à des amplitudes de mouvement appropriées : planteur est amené à effectuer des mouvements répétitifs et/ou un travail musculaire statique et il peut être nécessaire d'exercer une force.	Des changements doivent être apportés à court terme et des mesures à long terme visant à réduire les niveaux d'exposition aux facteurs de risque sont à planifier.	Orange
<i>Fort</i>	Postures de travail situées à la fin ou près de la fin de l'amplitude de mouvement avec des actions répétitives ou statiques nécessaires. Toutes les postures dans lesquelles les forces ou charges peuvent être excessives sont également incluses dans ce groupe	Un investissement et une modification de ces opérations sont nécessaires immédiatement pour réduire la charge excessive du système musculosquelettique et le risque de blessure pour planteur.	Rouge

Pour réaliser cette étude, le site expérimental du réseau PILOTE situé en Meuse a été utilisé. Quatre planteurs ont été évalués, travaillant après l'application de 4 méthodes de PMS et avec 2 essences plantées.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude et conditions météo

Le site d'étude pour l'évaluation de la plantation se situe en Meuse. Le sol est constitué d'un horizon argilo limoneux peu profond (5 à 40 cm) avec une forte charge en éléments grossiers. La pente est modérée sur l'ensemble du site (6% maximum). L'évaluation a été réalisée sur un jour réparti sur deux demi-journées : le 4 et 5 mars 2024. Le ciel était nuageux à ensoleillé avec une température entre 6 et 10°C.

2.2 Itinéraires de plantation évalués

Sur l'ensemble du site, des cloisonnements d'exploitation étaient présents tous les 18m et mesuraient 2 m de large. Les lignes de plantation ont été broyées avant la réalisation de la PMS et de la plantation. Dans la modalité en plateau, une bande centrale entre deux cloisonnements d'exploitation a été broyée à la même période. La PMS a été réalisée en novembre 2023. Deux essences ont été plantées : Cèdre de l'Atlas et Bouleau verruqueux en mars 2024.

Quatre itinéraires de plantation ont été étudiés :

- TEM : plantation en zone broyée, sans PMS (Figure 1).
- PLA : plantation dans les plateaux préparés à l'aide d'un Culti-Forest porté par une midi-pelle. La préparation est identique à celle en potet, mais appliquée à une surface plus importante. Les plateaux mesurent 5 m x 5 m, et 16 plants sont installés par plateau (Figure 2).



Figure 1 : Photographie de TEM après broyage



Figure 2 : Photographie de PLA après PMS

- POT : plantation au centre d'un potet préparé à l'aide d'un Culti-Forest porté par une midi-pelle. L'outil décape la surface du sol avec la rappe puis travaille le sol avec la dent sur 1 m² (Figure 3).
- SSL : plantation le long d'une ligne de PMS réalisée à l'aide un sous-soleur tracté en ligne. Le sous-soleur permet de décompacter le sol (Figure 4).



Figure 3 : Photographie de POT après PMS



Figure 4 : Photographie de SSL après PMS

Pour les modalités où les plants sont installés en ligne (TEM, SSL, POT), 5 lignes de plantations sont présentes entre deux cloisonnements (4 lignes de Cèdre et 1 ligne de Bouleau). Pour les modalités TEM et SSL, l'espacement est de 2.5m entre chaque ligne, de 1.9m entre deux plants de Cèdre et de 2.4m entre deux plants de Bouleau. Pour la modalité POT, l'espacement est de 2.5m entre les lignes, de 2.6m entre deux plants de Cèdre et de 2.4m entre deux plants de Bouleau. Pour les modalités où les plants sont installés en placeau, les placeaux sont alternés entre deux cloisonnements à gauche est à droite d'une ligne centrale. Deux placeaux successifs sont espacés de 5m. L'essence est alternée par placeau. Sur l'ensemble des modalités hormis pour PLA, l'emplacement de chaque plant a été matérialisé préalablement à la plantation par un bambou de 50 cm.

2.3. Planteurs

Les quatre planteurs présents le jour de la plantation ont été suivis. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Présentation des différents planteurs évalués

Planteur 1	Planteur 2	Planteur 3	Planteur 4
Francophone	Francophone	Non francophone	Non francophone
18 ans	49 ans	58 ans	60 ans
1m80	1m78	1m68	1m70
Gaucher	Droitier	Droitier	Droitier
En apprentissage dans une pépinière avec 6 mois d'expérience en plantation.	30 ans d'expérience en plantation.	2 ans d'expérience en plantation.	2 ans d'expérience en plantation.
Pas de problèmes de santé connus. Nageur confirmé de longue distance avec des entraînements journaliers.	Pas de problèmes de santé connus mais fait mention de douleur au dos de temps en temps.	Les difficultés d'échange ne permettent pas d'avoir plus d'informations.	
En activité de plantation la semaine précédente.	En activité de plantation la semaine précédente.	Les difficultés d'échange ne permettent pas d'avoir plus d'informations.	

2.4. Matériel végétal

Les deux essences plantées avaient des conditionnements différents (Figure 5) :

- *Cèdre (C)* : plants de 2 ans transplantés en godet (G) la deuxième année. Godet de 400 cm³ avec une hauteur moyenne de plants de 33 cm. Les plants étaient stockés par 50 dans des cagettes bois. La cagette pleine pesait entre 11 et 12 kg.
- *Bouleau (B)* : racines nues (RN) 1+0, avec une hauteur moyenne de 55 cm. L'habillage des plants avait été réalisé en pépinière, avant livraison. Les plants étaient stockés par bottes de 50 plants dans de gros sacs. Un sac contenant une botte pesait entre 2 et 2,5 kg.



Figure 5 : Les deux essences plantées et leur mode de conditionnement (en cagette ou en sac)

L'outil pioche a été utilisé pour la mise en place des plants (Figure 6). Tous les planteurs ont utilisé le même modèle de pioche Leborgne avec un manche en fibre de verre. Le manche a une longueur de 91,5 cm et le fer mesure 43 cm. Une pioche pèse 2,6 kg.



Figure 6 : Photographie de l'outil pioche

2.5. Répartition des modalités suivies par planteur

Le suivi des planteurs a été organisé en sessions d'évaluation, chacune correspondant à un planteur suivi sur une modalité et une essence données. Le nombre de sessions d'évaluation réalisées par modalité et par essence est présenté dans le Tableau 3.

Tableau 3: Nombre de sessions d'évaluation réalisées par modalité et par essence, pour l'ensemble des planteurs

<i>Essences\Modalité</i>	TEM	POT	SSL	PLA
<i>Cèdre</i>	4	4	3	3
<i>Bouleau</i>	1	2	1	2

Pour chaque planteur, l'ordre de passage sur les combinaisons modalité x essence a été défini aléatoirement. Tous les planteurs n'ont pas été évalués sur les mêmes modalités afin de pouvoir prospecter un maximum de modalités tout en limitant la durée de suivi sur chaque planteur. Le Tableau 4 récapitule les modalités plantées par les planteurs et l'ordre de réalisation sur la journée.

Tableau 4: Modalités de PMS et essences évaluées par chaque planteur et ordre d'évaluation. En orange sont représentées les modalités réalisées le second jour de suivi.

<i>Planteur</i>	Session 1	Session 2	Session 3	Session 4	Session 5
<i>1</i>	TEM - B	SSL - B	POT - C	SSL - C	TEM - C
<i>2</i>	SSL - C	TEM - C	POT - C	PLA - C	PLA - B
<i>3</i>	PLA - C	PLA - B	POT - B	TEM - C	POT - C
<i>4</i>	POT - C	POT - B	PLA - C	SSL - C	TEM - C

2.6. Mesures

Au début de chaque demi-journée, un temps de plantation est laissé aux planteurs pour leur permettre de s'échauffer. Une fois que les planteurs se sentent prêts, le suivi commence. Les planteurs ont été suivis et filmés sur chacune de leur session. En fin de journée, un questionnaire leur a été soumis et un échange oral sur les modalités et leur ressenti a été réalisé.

Déroulement des sessions et suivi vidéo

Un cameraman a été attiré à chaque planteur. Pour chaque session le suivi s'est déroulé selon les mêmes séquences. Après une phase de mise en jambe sur une trentaine de plants, le planteur a été filmé en continu. Tous les 16 plants, le cameraman a changé de côté pour la prise vue, variant entre les profils gauche, droite et de face. Des temps de pause en milieu de session d'évaluation ont été proposés et ne sont pas pris en compte dans les temps évalués. Entre deux sessions successives, un temps de pause a été mis en place. Le suivi vidéo pour chaque session a varié entre 11 et 31 minutes avec un suivi moyen de 20 min. Cette durée a permis de suivre pour chaque session l'installation de 32 à 62 plants, avec un nombre moyen de 47 plants.

Entretien

A la fin de la demi-journée, les deux planteurs francophones ont complété un questionnaire concernant leur ressenti sur la demi-journée.

La première partie du questionnaire comprenait 4 questions qui consistaient à évaluer chaque modalité réalisée par le planteur, selon différents critères de pénibilité. Une note sur une échelle allant entre 0 et 10, correspondant à une pénibilité croissante, était attribuée. La signification de l'échelle variait selon la question :

- Q1 : Evaluation en termes de gestes et postures : 0 « les gestes et postures que je dois prendre ne sont pas pénibles pour moi » à 10 « je dois très souvent prendre des gestes et postures qui ne sont pas bons ».
- Q2 : Evaluation en termes de facilité de cheminement : 0 « le cheminement ne m'a posé aucune difficulté » à 10 « le cheminement est compliqué ».
- Q3 : Evaluation en termes de déplacement de charge : 0 « la charge ne pose pas de problème » à 10 « la charge est lourde et très pénible sur le long terme ».
- Q4 : Evaluation en termes de répétitivité des mouvements : 0 « mes gestes sont posés et n'ont pas besoin d'être répétés » et 10 « la plupart des actions doivent être répétées »

La deuxième partie du questionnaire comprenait 2 questions qui évaluaient les contraintes et les risques ressentis pour chaque modalité selon une note d'intensité comprise entre 0 « nul » et 3 « fort ».

- Q5 : Niveau de contraintes physiques ressenti par le planteur sur 6 zones du corps : mains/doigts, poignets, épaules, coude, dos, jambes/pieds. Une note est attribuée pour chaque zone.
- Q6 : Niveau de risque ressenti par le planteur pour 5 types de risques : chutes, TMS de charge, TMS de répétition, coupure, choc. Une note est attribuée pour chaque type de risque.

La troisième partie du questionnaire comprenait 1 question sur la pénibilité globale des modalités et consistait à positionner chaque modalité sur une échelle allant entre 0 et 10 :

- Q7 : Pénibilité globale : 0 « modalité peu pénible » et 10 « modalité très pénible ».

2.7. Traitement des données

Le protocole pour analyser les prises vidéos et estimer les scores de posture RULA pour chaque session de mesure est détaillé dans Puyal et al. (2025).

Trois modalités suivies étaient des modalités de plantation après PMS (PLA, POT, SSL). Elles ont été regroupées lors de la comparaison des résultats entre les modalités travaillées et non travaillées (TEM). Deux essences ont été suivies. Lors des comparaisons des résultats entre essences (Cèdre vs Bouleau), seules les évaluations réalisées pour les deux essences sur un même planteur et une même modalité ont été utilisées.

Définition des phases de travail

Pour l'analyse, le travail de plantation a été divisé en cycles. Chaque cycle de plantation comprenait l'entièreté des actions et mouvements entrepris par planteur pour planter un plant. Le cycle commençait au moment où le planteur se déplaçait vers le plant et se terminait lorsque le plant était en terre et que la terre était tassée autour du plant, ou lorsque le planteur changeait de zone de travail.

Chaque cycle était lui-même divisée en actions unitaires, appelées phases (actions qui durent dans le temps) ou mouvements ponctuels (actions ponctuelles dans le temps), qui constituaient chacun un ensemble de gestes homogènes.

L'observation des planteurs sur le terrain et sur les vidéos a permis de définir les différentes phases et mouvements ponctuels du cycle de plantation (Tableau 5). La Figure 7 montre les 5 principales phases du travail de plantation.

Tableau 5 : Descriptif des phases évaluées dans le cycle de plantation

Nom de la phase	Description
<i>Avancement</i>	Avancement entre deux plants
<i>Manutention</i>	Réapprovisionnement en plant ou répartition des plants sur le plateau
<i>Positionnement</i>	Réalignement du planteur par rapport aux autres plants
<i>Décapage</i>	Décapage de la végétation
<i>Coup-décap</i>	Coup de pioche pour décaper la végétation ou enlever les rémanents
<i>Travail du sol</i>	Travail du sol : création du trou de plantation
<i>Coup-trou</i>	Coup de pioche pour réaliser le trou
<i>Mise en terre</i>	Mise en terre du plant
<i>Coup-terre</i>	Coup de pioche pour remettre de la terre autour du plant
<i>Tassement</i>	Tassement de la terre autour du plant
<i>Coup-tassement</i>	Coup de talon pour tasser le sol autour du plant
<i>Nettoyage</i>	Nettoyage de l'outil
<i>Pause</i>	Pause dans le travail (repos, échange avec le cameraman, ...)
<i>Changement</i>	Changement de zone de travail (ligne, plateau)

Lors de l'analyse, la phase « Pause » a été retirée du jeu de données pour toutes les modalités, car cette phase est extrêmement variable et dépend essentiellement d'évènements externes (ex. appel téléphonique). La phase « Changement » a été retirée pour les modalités TEM, SSL et POT car elle n'était que peu représentée dans ces modalités (qui comportent des longues lignes de plantation avec peu de passage des planteurs d'une ligne à l'autre). En revanche, cette phase a été maintenue dans l'analyse de la modalité PLA car les changements (entre plateaux) étaient nombreux.



Figure 7 : Les 5 principales phases de travail : travail du sol (A), mise en terre du plant (B), tassement (C), déplacement cagette (D), déplacement sac (E).

Analyse de la productivité et de la répétitivité

L'identification et la délimitation temporelle sur les vidéos, des phases et des mouvements ponctuels identifiés en Tableau 5 ont été réalisées avec le logiciel BORIS¹, Behavioral Observation Research Interactive Software (Friard and Gamba, 2016). La version 8.25.4 du logiciel a été utilisée. Ce logiciel open source permet à partir d'une liste d'actions définies (cf Tableau 5), d'encoder sur une vidéo le début et la fin d'une action ainsi que la répétition de mouvements. Le résultat en sortie est un fichier texte comprenant un temps de début et de fin pour chaque phase encodée.

A partir du fichier de sortie de BORIS, la durée de chaque phase et de chaque cycle de plantation (chaque plant mis en terre) a été estimée par modalité. Le nombre de mouvements au sein des phases décapage, travail du sol, mise en terre et tassement a été estimé par modalité.

L'ensemble des cycles filmés ont été utilisés pour cette analyse de la productivité et de la répétitivité (Tableau 6).

¹ Pour télécharger le logiciel : https://www.boris.unito.it/download_win/

Tableau 6 : Nombre de cycles utilisés pour l'analyse de la répétitivité et de la productivité

	Bouleau	Cèdre	TOTAL par modalité
PLA	98	152	250
POT	89	197	286
SSL	47	134	181
TEM	41	191	232
TOTAL par essence	275	674	949

Des analyses statistiques ont été réalisées pour comparer la productivité et la répétitivité des mouvements dans les différentes modalités en utilisant un modèle linéaire simple et une anova de type III. Ces résultats ont été intégrés dans l'interprétation des graphiques.

Analyse du risque postural

Pour l'analyse des postures, 3 à 5 cycles ont été analysés par planteur et par modalité, soit 22 à 28 cycles par planteur. Ce nombre a varié en fonction de la qualité des prises vidéo. Au total, l'analyse a été réalisée sur plus de 82 000 images. L'analyse a été réalisée pour les deux côtés (droite et gauche) de planteur et en regroupant ensuite les résultats des différents planteurs en côté dominant (= main droite pour les droitiers et main gauche pour les gauchers) et côté non dominant.

Pour chaque cycle à analyser, les angles et les scores associés, pour la nuque, le tronc, les coudes, et les épaules ont été estimés selon la méthode RULA à l'aide du logiciel Hapo LEA² développé par ErgoSanté. Hapo LEA est un outil d'analyse posturale qui, à partir d'une vidéo cadrée d'une personne en mouvement, identifie automatiquement les articulations, calcul un angle puis le score RULA associé pour les zones du corps épaule, nuque, tronc, coude de chaque côté du corps, pour chaque image de la vidéo.

La posture des poignets gauche et droit et les scores associés ont été estimés visuellement pour chaque phase et validé avec le logiciel Kinovéa³ lorsque nécessaire. Kinovéa est un logiciel open source qui permet la mesure d'angle sur des images de vidéos.

La charge portée et l'activité musculaire de chaque planteur, sur chaque phase de travail et pour chaque côté du planteur ont été estimées à partir d'une visualisation des vidéos et en utilisant les mesure du poids du matériel.

Pour le calcul du score final RULA, se référer au protocole détaillé dans Puyal et al. (2025).

3. Résultats

3.1. Durée d'un cycle de plantation

Sur notre chantier, la durée médiane d'un cycle de plantation est de 21,4 s, tous planteurs, essences et modalités confondus. Cette durée varie selon les modalités (Figure 8) : 18,1 s pour POT, 20,6 s pour PLA, 22,1s pour SSL et 23,6 s pour TEM. Toutes les modalités sont significativement différentes les unes des autres sauf PLA et SSL. On observe une plus grande variabilité de la durée d'un cycle pour les modalités PLA et TEM. Pour TEM, le planteur a parfois dû reprendre le travail plusieurs fois lorsque qu'il a rencontré certains facteurs bloquants. Pour PLA, le temps de positionnement au sein du placeau peut être plus long pour certains planteurs. Sur les autres modalités, un piquetage préalable des lignes avait été réalisé, la phase de positionnement n'est donc pas présente dans ces modalités.

² Accès en ligne au logiciel : <https://lea.hapo.eu>

³ Pour télécharger le logiciel : <https://www.kinovea.org/>

Si on simule sur une journée de 1 000 plants, sans pause ni réapprovisionnement, le temps estimé de travail effectif médian est de 6h, et varie entre 5h00 et 6h30 selon les modalités avec un écart-type oscillant entre 4h et 9h.

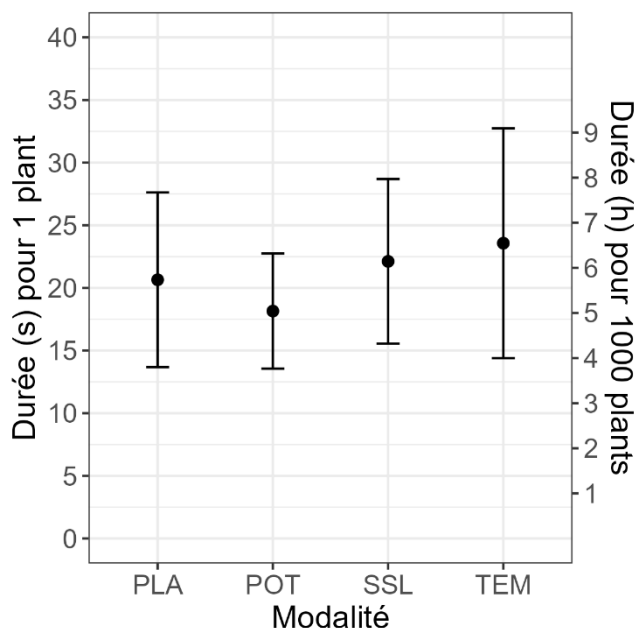


Figure 8 : Durée médiane, en seconde pour un cycle de plantation et en heure pour un équivalent de 1000 cycles de plantation et l'écart-type par modalité pour tous les planteurs et les essences confondus

La durée médiane d'un cycle de plantation est légèrement inférieure pour les plantations réalisées après préparation mécanisée du site en comparaison avec la modalité TEM sans préparation mécanisée du site, avec respectivement 20,3 s contre 23,6 s (Figure 9, gauche). Cette différence est statistiquement significative. Lorsque l'on regarde plus précisément l'essence, on observe un temps de cycle plus long pour la mise en place du bouleau (conditionné en racines nues) en comparaison avec le cèdre (conditionnée en godet) avec respectivement 25,2 s contre 21 s (Figure 9, droite). Cette différence est statistiquement significative. On observe une variabilité plus importante du temps de mise en terre pour le bouleau.

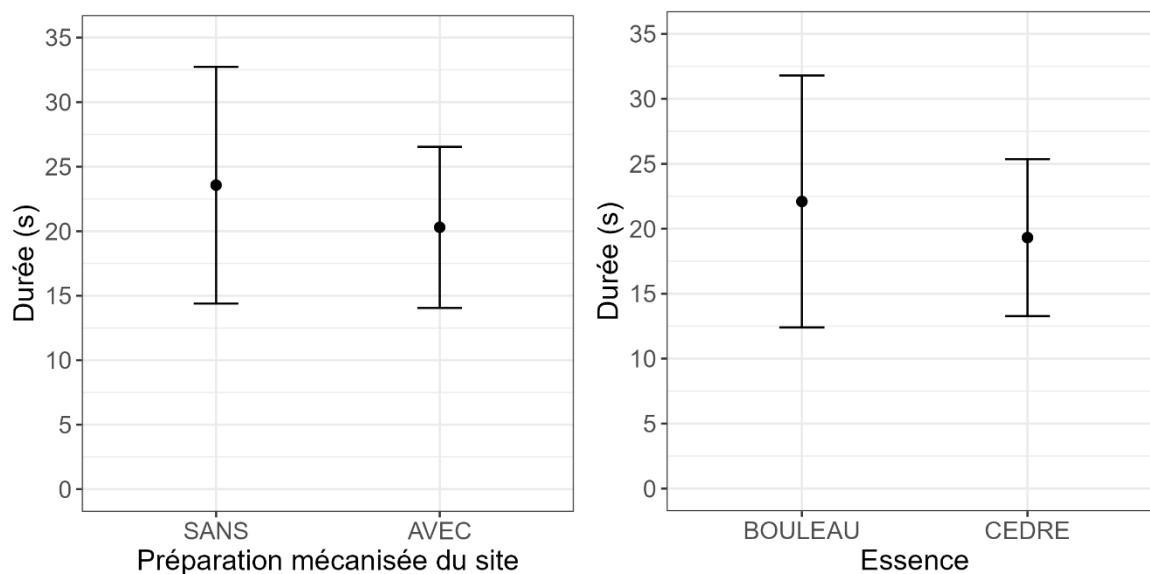


Figure 9: Durée médiane du cycle de plantation (en seconde) et écart-type en fonction de la réalisation ou non d'une préparation mécanisée du site préalable (graphique gauche) et de l'essence plantée (graphique de droite)

3.2. Répartition du temps par phase

La part du temps correspondant au travail de plantation (ensemble des phases en gris et noir) est de 83% pour TEM, 79% pour SSL, 72% pour POT et 65% pour PLA (Figure 10). Le reste du temps est consacré au déplacement, à la manutention, au positionnement sur les lignes ou au nettoyage. TEM est donc la modalité pour laquelle la part de temps du travail de plantation est la plus grande.

Pour toutes les modalités, la mise en terre est la phase qui présente la durée la plus longue.

En moyenne, on observe une part du temps accordée au travail du sol plus importante dans TEM (31% du temps contre moins de 20% pour les autres modalités). La part du temps consacrée à la plantation est plus importante pour POT et SSL.

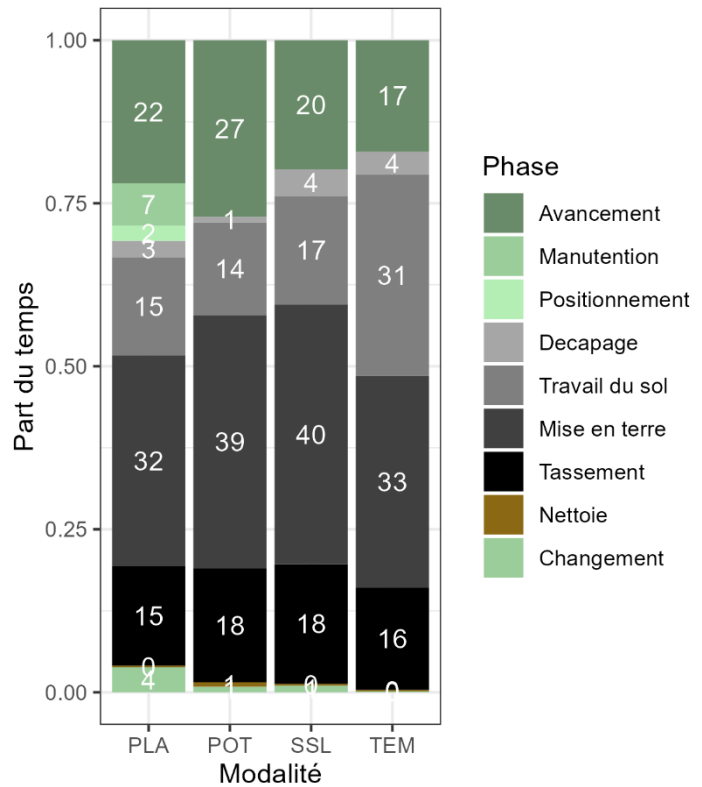


Figure 10 : Part du temps consacrée à chaque phase observée au cours d'un cycle de plantation, pour chaque modalité

3.3. Répétition des coups portés

Au sein des différentes phases, 4 mouvements correspondant à différents coups portés peuvent être répétés plusieurs fois dans chaque cycle de plantation (Figure 11) :

- Coup-decap : Coup de pioche pour décapier la végétation, déblayer les rémanents. Mouvements d'avant en arrière. En moyenne cette action est répétée 2 fois dans le cycle et peut être répétée jusqu'à 9 fois.

- Coup-trou : Coup de pioche pour réaliser le trou de plantation. Mouvements de haut en bas. Dans la majorité des cas, cette action est effectuée une seule fois par cycle, mais elle peut être répétée jusqu'à 8 fois.

- Coup-terre : Coup de pioche pour remettre la terre autour du plant. Petits mouvements dans différentes directions (gauche, droite, avant, arrière) autour du plant. La valeur médiane pour cette action est de 3 répétitions dans le cycle mais elle peut être répétée jusqu'à 15 fois.

- Coup-tassement : Coup de talon pour tasser la terre autour du plant. En moyenne cette action est répétée 4 fois dans le cycle mais peut être répétée jusqu'à 14 fois.

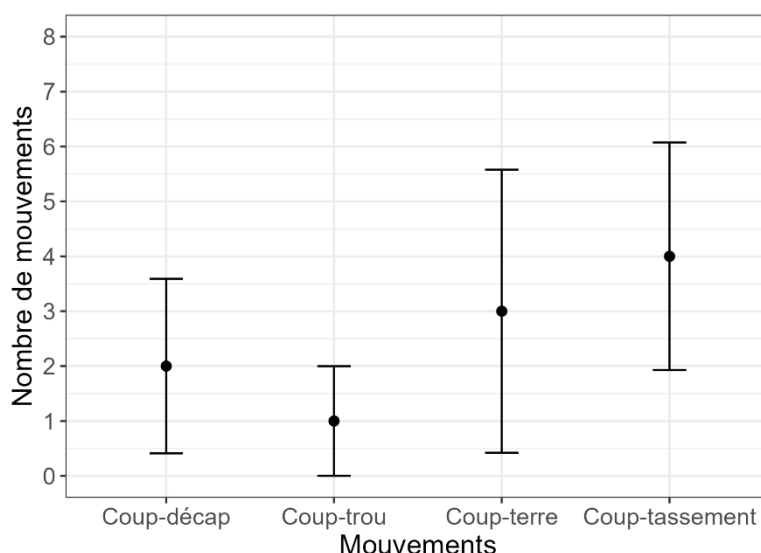


Figure 11 : Nombre de coups portés pour chaque type de mouvement, au sein d'un cycle de plantation

Le nombre de coups médian pour le mouvement « Coup-trou » est plus élevé lorsque le plant est installé dans la modalité TEM (sans PMS), dans laquelle le nombre de coups se trouve doublé par rapport aux modalités avec PMS (Figure 12, gauche). Cette différence est significative. Pour les autres actions, la répétition reste similaire entre les modalités avec ou sans PMS.

Le nombre médian de coups pour le mouvement « Coup-trou » est plus élevé lorsque planteur plante du cèdre (plants en godet) que du bouleau (plants en racines nues). Cette différence est statistiquement significative avec un coup en plus tous les 4 cycles. Le nombre médian de coups pour le mouvement « Coup-tassement » est plus élevé lorsque planteur plante du bouleau que du cèdre. Cette différence est statistiquement significative avec un coup en plus tous les 2 cycles. Pour les autres actions, la répétition est similaire pour les deux essences. (Figure 12, droite).

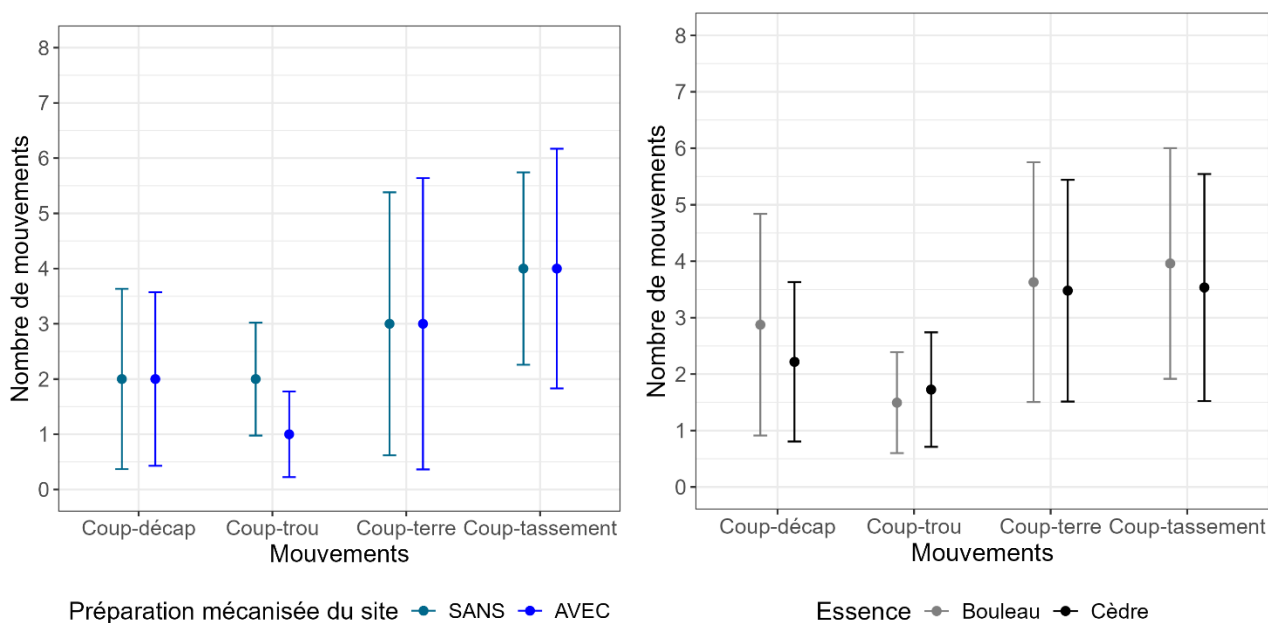


Figure 12 : Nombre de coups portés par type de mouvement dans un cycle de plantation, en fonction de la réalisation ou non d'une préparation mécanisée du site préalable (graphique gauche) et de l'essence plantée (graphique de droite)

3.4. Scores posturaux

Sur l'ensemble de l'activité, tous planteurs, modalités et essences confondus (Tableau 7), le niveau de risque considéré comme négligeable représente moins d'1% du temps d'activité, alors que les niveaux moyens à fort représentent 80 à 87% du temps, selon le côté du planteur considéré (dominant ou non dominant). Le côté non-dominant montre un niveau de risque un peu plus élevé que le côté dominant.

Tableau 7 : Part du temps dans chaque niveau de risque de TMS, tous planteurs, modalités et essences confondus pour le côté dominant et pour le côté non-dominant du planteur

Niveau de risque	Côté dominant	Côté non dominant
Négligeable	<1%	<1%
Faible	20%	13%
Moyen	77%	84%
Fort	3%	3%

Le niveau de risque négligeable qui représente moins de 1% du temps (Figure 13) a été observé sur un seul planteur dans une seule modalité. Le risque faible est observé pendant 11 à 25% du temps selon le côté du planteur et la modalité. Le niveau de risque moyen représente 72 à 86% et le niveau de risque fort 1 à 6 % du temps selon le côté du planteur et la modalité. On n'observe pas de différences importantes dans le niveau de risque entre les modalités.

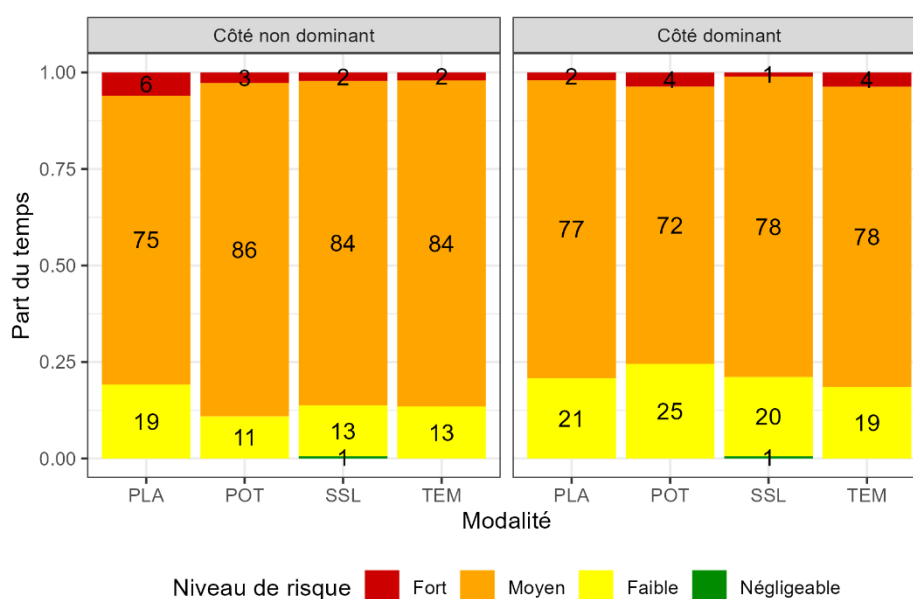


Figure 13 : Part du temps dans chaque niveau de risque lors d'un cycle de plantation selon les modalités, toutes essences confondues, pour le côté dominant et non dominante du planteur

On observe peu de différences sur la répartition du temps dans les différents niveaux de risque entre une plantation réalisée avec PMS ou sans PMS (Figure 14, gauche), ainsi qu'entre une plantation de bouleau ou de cèdre (Figure 14, droite).

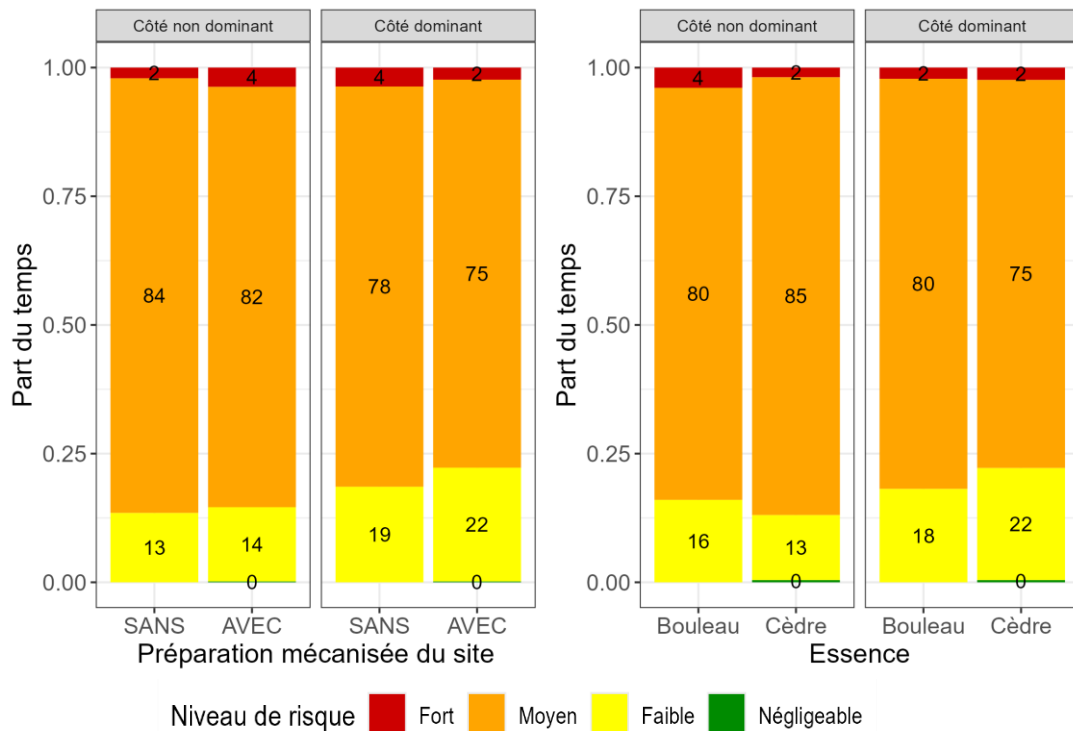


Figure 14 : Part du temps dans chaque niveau de risque lors d'un cycle de plantation, toutes modalités confondues, pour le côté dominant et pour le côté non dominant du planteur, en fonction de la réalisation ou non d'une préparation mécanisée du site préalable (graphiques de gauche) et de l'essence (graphiques de droite)

Si on examine les phases de travail (Figure 15), on constate que la phase de tassement est celle qui présente le niveau de risque le plus bas, avec 50% du temps en risque faible et 50% en risque moyen, quel que soit le côté (dominant ou non-dominant). Les phases d'avancement et de décapage diffèrent entre les deux côtés : pour le côté dominant, le niveau de risque moyen représente 62 et 75% du temps et il n'y a jamais de risque fort. Pour le côté non dominant, on constate un niveau de risque plus important avec 15% de risque fort lors du décapage et 5% lors du déplacement (port de la caisse ou du sac de plants). Le travail du sol implique les deux côtés du corps d'une manière assez similaire avec un niveau de risque moyen pendant 89 à 93% du temps, quel que soit le côté. Enfin l'acte de plantation entraîne une posture avec un niveau de risque moyen dans 92 à 95% du temps et avec un niveau de risque fort le reste du temps.

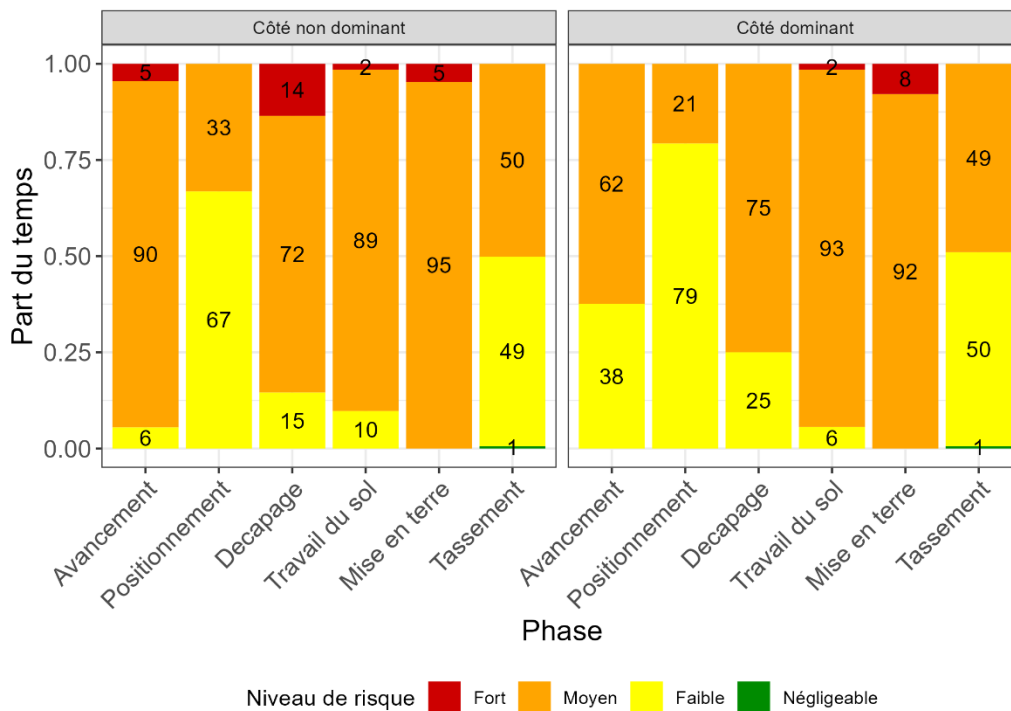


Figure 15 : Part du temps dans chaque niveau de risque lors d'un cycle de plantation, toutes modalités confondues, pour le côté dominant et pour le côté non dominant du planteur, en fonction de la phase

Les différentes parties du corps ne sont pas sollicitées avec la même intensité, et la sollicitation de chaque partie varie avec les phases de travail, ce qui entraîne des niveaux de risque très différents selon les parties du corps et les phases de travail considérées. La Figure 16 représente les scores atteints pour les parties du corps les plus sollicitées. Les scores pour les coudes ne sont pas présentés dans la figure car ils sont toujours dans des niveaux négligeables et sans variation entre les phases. Les épaules montrent des scores qui se situent toujours dans des niveaux de risque négligeable ou faible, avec des scores décroissants de la phase de plantation, au travail du sol, au décapage, à l'avancement puis au tassement. Les scores des épaules sont légèrement plus faibles du côté dominant que du côté non dominant. Les poignets montrent des scores qui se situent toujours dans des niveaux de risque négligeables, avec des différences entre les côtés dominant et non dominant. Ils sont plus fortement sollicités lors de l'avancement pour le côté non dominant avec le portage du sac ou de la cagette, et lors du travail du sol et de la plantation pour le côté dominant avec la tenue de la pioche. La nuque présente des niveaux de risque moyens durant toutes les phases de travail, avec des scores qui varient assez peu entre les phases. Le tronc présente des niveaux de risque faibles à moyens. Il est principalement sollicité lors des phases de décapage, travail du sol et plantation, lorsque le planteur se penche.

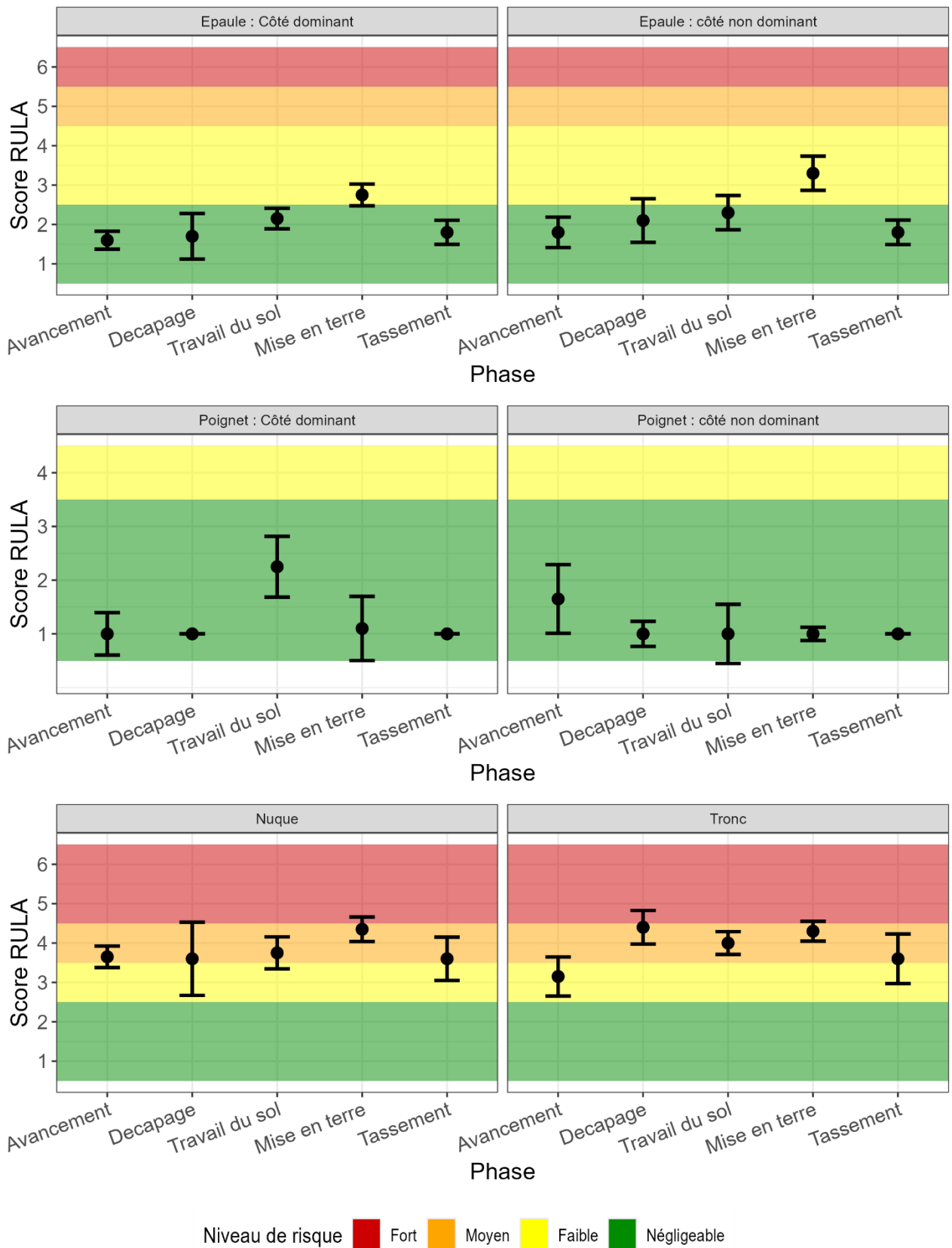


Figure 16 : Score RULA et niveau de risque pour chaque phase de travail, pour les épaules (côté dominant et côté non dominant), les poignets (côté dominant et côté non dominant), la nuque et le tronc

3.5. Entretien avec les planteurs

Les résultats de deux questionnaires sont présentés ci-dessous. Le questionnaire n'a pas pu être réalisé avec les personnes non francophones. Pour le planteur 1, la modalité PLA n'a pas été évaluée sur cette étude, le questionnaire n'a donc été complété que pour les modalités POT, SSL et TEM.

- Pénibilité des gestes et postures, selon les modalités

Le planteur 1 qui est aussi le planteur le plus jeune, considère qu'il n'y a pas de différence de pénibilité entre les modalités en termes de gestes et postures : une légère pénibilité générale est ressentie avec une note de 2,5 attribuée à l'ensemble des modalités (Figure 17).

En revanche, le planteur 2 rapporte des différences : POT est considéré sans aucune pénibilité ; PLA est très légèrement pénible, principalement à cause des éléments grossiers du sol qui sont remontés en surface lors de la PMS ; TEM est notée 4 en raison des racines de la végétation en place qui peuvent gêner de temps en temps ; SSL est également notée 4, à cause du creux créé par l'outil qui impose au planteur de se baisser plus fortement.

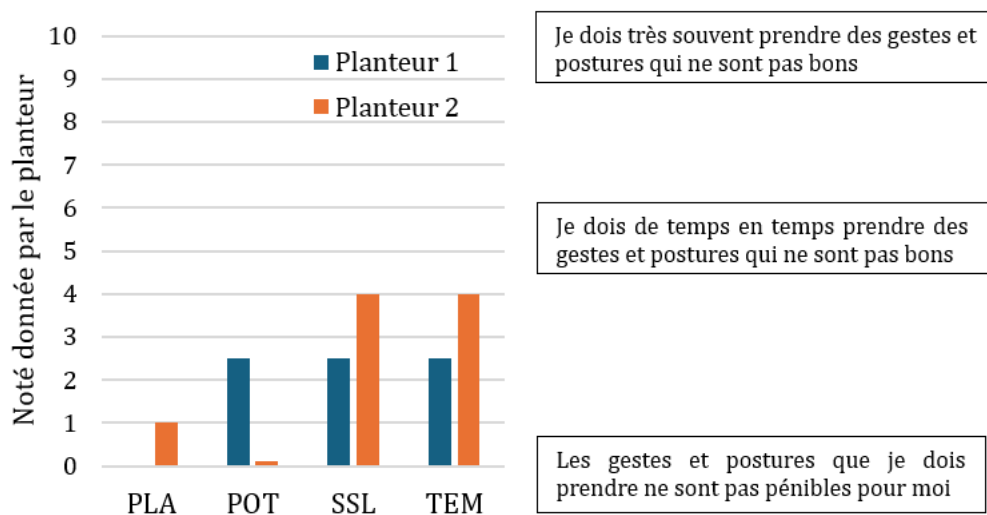


Figure 17 : Positionnement des modalités par les planteurs sur l'échelle de pénibilité des gestes et des postures

- Facilité de cheminement, selon les modalités

Le planteur 1 n'a rencontré aucune difficulté pour se déplacer dans TEM (Figure 18). Il rapporte une difficulté de temps en temps dans POT avec une note de 2,5, car il a dû se décaler par rapport à la ligne de plantation pour passer d'un potet au suivant, le passage le plus direct entre deux potets successifs étant obstrué par les rémanents. SSL présente les plus fortes difficultés de déplacement avec une note de 7,5 car la raie de sous-solage crée des irrégularités dans le sol au niveau de la zone travaillée.

Le planteur 2, considère les différentes modalités au même niveau de difficulté et leur attribue la même note de 3. Pour ce planteur le cheminement ne pose pas de problèmes particuliers grâce au broyage qui a été préalablement réalisé même si, de temps en temps, certaines difficultés pour se déplacer sont présentes dans l'ensemble des modalités.

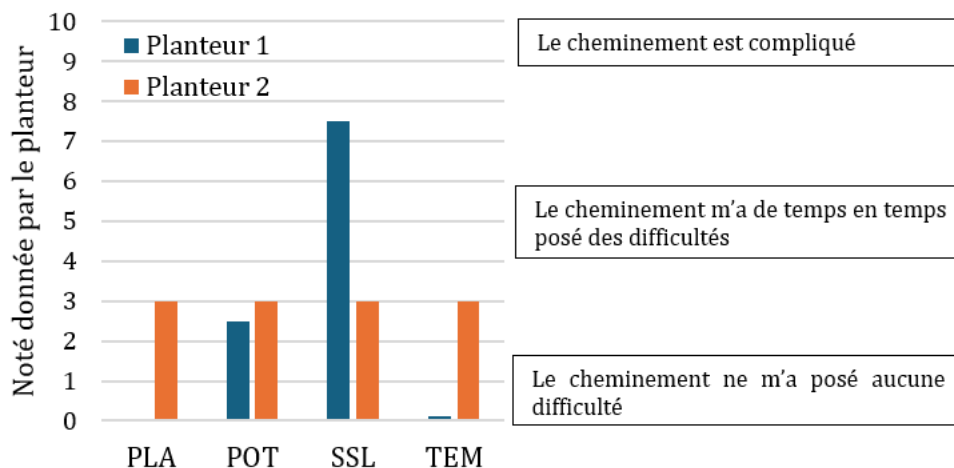


Figure 18 : Positionnement des modalités par les planteurs sur l'échelle de pénibilité du cheminement

- Portage de charge, selon les essences

Le planteur 1 ne déclare pas de différences entre les deux essences (qui présentent des conditionnements différents) par rapport à la pénibilité due au portage des plants, et leur attribue la même note de 0 (Figure 19).

Le planteur 2 considère que porter des cagettes de plants de cèdre en godet est plus difficile (note de 2,5) que de porter des sacs de plants de bouleau en racines nues (note de 1). Les cagettes sont plus lourdes que les sacs et contiennent moins de plants. La difficulté provient en premier lieu de l'augmentation du nombre de ravitaillements à effectuer et, en second, de l'augmentation de la charge à porter.

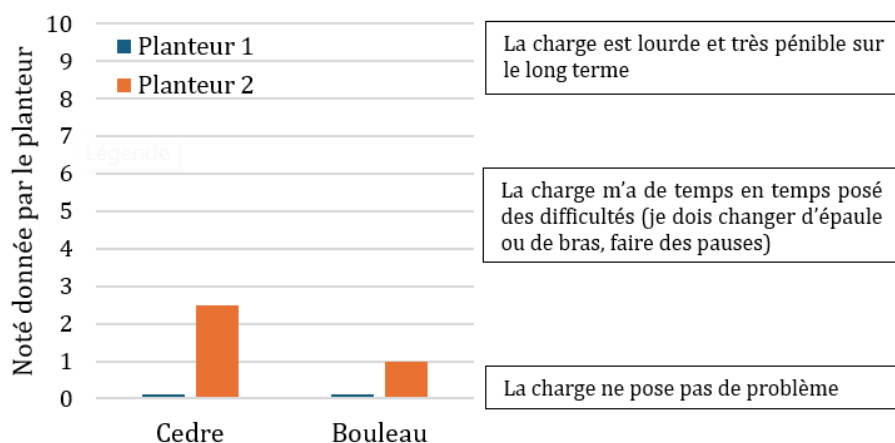


Figure 19 : Positionnement des modalités par les planteurs sur l'échelle de pénibilité du déplacement de charge

- Répétitivité des mouvements, selon les modalités

Selon le planteur 1, la modalité PLA est celle qui demande le moins de répétitions des mouvements et obtient une note de 0 (Figure 20). SSL demande un peu plus de répétitions, en raison de la présence de branches et de racines sur la ligne. Dans quelques cas, où la raie de sous-solage n'a pas été créée lors de la PMS, le travail devient identique à celui réalisé dans la modalité TEM. TEM obtient la note maximale de 10, avec des répétitions pour tous les mouvements.

Le planteur 2 considère que les modalités PLA et POT présentent un niveau de répétitions très faible (note de 0) et place les modalités SSL et TEM au même niveau, avec une note de 5.

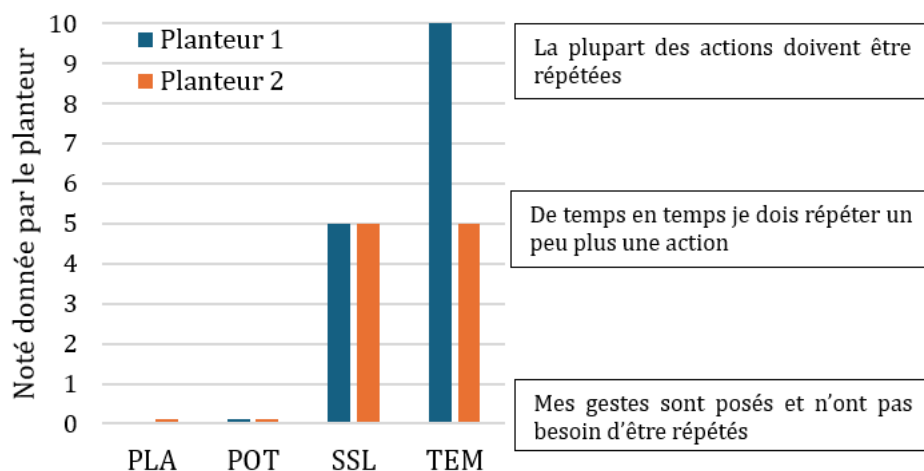


Figure 20 : Positionnement des modalités par les planteurs sur l'échelle de répétitivité des mouvements

- Contraintes physiques ressenties sur les différentes zones du corps selon les modalités (Tableau 8)

Le planteur 1 a ressenti peu de contraintes physiques, hormis une contrainte faible au niveau du dos pour toutes les modalités.

Le planteur 2 a ressenti une contrainte faible à très faible dans les mains, les doigts, les poignets, les jambes, les pieds dans toutes les modalités. Les contraintes dans le coude et les épaules étaient faibles dans les modalités PLA, POT et SSL, et moyennes dans TEM. La contrainte dans le dos était moyenne dans TEM et SSL. Le planteur 2 trouve que la plantation dans TEM et SSL induit plus de vibrations et plus de courbure du corps. Dans les modalités PLA et POT, le poids de la pioche est presque suffisant pour faire le trou de plantation, ce qui permet de taper moins fort et crée ainsi moins de vibrations que sans les modalités TEM et SSL. Les jambes sont plus sollicitées dans les modalités avec PMS (POT, PLA, SSL) car la cadence de plantation est alors importante et, dans ce cas, les jambes « tirent » plus.

Tableau 8 : Contraintes physiques ressenties par les planteurs pour les différentes zones du corps (0 : Pas de contrainte, 0.5 Contrainte très faible, 1 faible, 2 moyenne, 3 forte)

Contraintes physiques ressenties	Planteur 1		Planteur 2				
	Dos	Mains / Doigts	Poignets	Epaules	Coude	Dos	Jambes / Pieds
TEM	1	1	1	2	2	2	0.5
SSL	1	1	1	0	1	2	0.5
POT	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1
PLA	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1

- Niveau de risque ressenti selon les modalités

Le planteur 1 n'a ressenti aucun risque particulier.

Le planteur 2 n'a pas ressenti de risque de chute ou de coupure. Il a noté un risque de choc : la pioche peut taper dans le pied ou sur le tibia ou peut taper dans des cailloux. Il considère que le risque est faible dans les modalités TEM et SSL, et très faible dans PLA et POT car les coups portés sont moins forts dans ces modalités. Le risque ressenti d'apparition de TMS due à des mouvements répétitifs est faible dans toutes les modalités. Enfin le risque ressenti d'apparition de TMS due à des déplacements de charge est faible pour le portage des plants en godets dans les cagettes, et nul pour le portage des plants dans les sacs. La planteur 2 n'a jamais ressenti de risque moyen ou fort.

- Notation globale des modalités, en termes de pénibilité (Figure 21)

Le classement des modalités en fonction de la pénibilité globale montre que les deux planteurs classent les modalités dans le même ordre, mais les niveaux d'intensité relevés diffèrent. Les modalités POT et PLA sont les moins pénibles. La modalité SSL est intermédiaire : légèrement plus pénible que POT et PLA pour le planteur 1, et proche de TEM pour le planteur 2. Enfin TEM est considérée comme plus pénible que les autres modalités, avec une note de 1 donnée par le planteur 1 et une note de 5 donnée par le planteur 2.

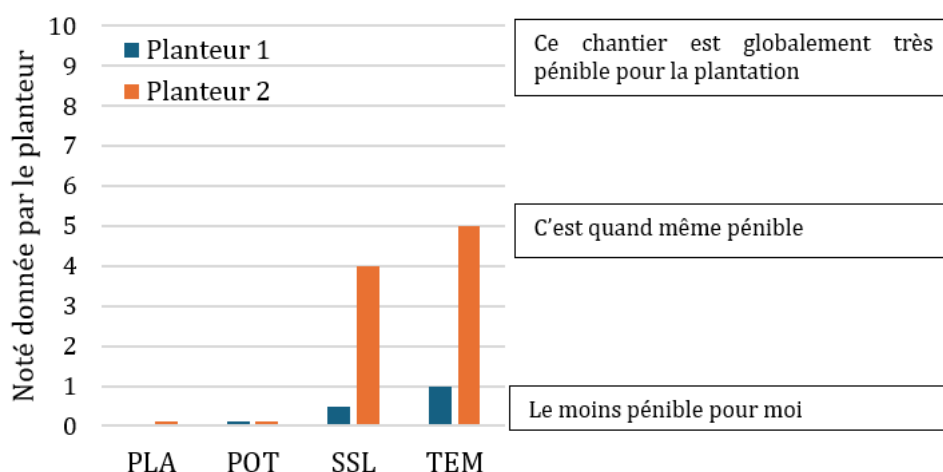


Figure 21 : Positionnement des modalités par les planteurs sur l'échelle de pénibilité générale

- Echange libre à la suite du questionnaire

L'échange libre qui a suivi le questionnaire a permis de mettre en avant différents points spécifiques aux différentes modalités et de mieux comprendre le ressenti des planteurs (Tableau 9). Une remarque générale est liée aux caractéristiques pédologiques du site de plantation : la texture limono-argileuse et l'humidité forte du sol induisent une terre qui accroche à la pioche et alourdit l'outil lors du travail, et demande un nettoyage plus fréquent.

Tableau 9 : Remarques des planteurs sur les différentes modalités, issues des échanges libres après les entretiens

TEM	SSL	POT	PLA
Lorsque la zone est correctement broyée il n'y a pas de contrainte particulière hormis des racines de temps en temps qui posent problème et qui demandent de	La ligne de travail n'est pas toujours présente et visible. Il faut se baisser de manière plus importante pour pouvoir planter	Il y a besoin de se décaler tout le temps entre la ligne à planter et l'interligne pour	Il n'y a pas de contraintes particulières sur cette modalité hormis la

changer d'emplacement. Cela induit un nombre de mouvements plus important pour le même travail.	dans le creux de la ligne et le tassement est plus compliqué.	pouvoir avancer entre les placeaux.	présence de cailloux en surface.
---	---	-------------------------------------	----------------------------------

Préparation mécanisée du site	Essence (différents conditionnements)
Pour un des planteurs, la sensation de fatigue est plus importante quand il plante sur les modalités travaillées car il répète beaucoup souvent l'action par rapport aux modalités non travaillées où il ressent de manière plus importante ses muscles et notamment ses jambes travailler.	<p>Dans le cas de notre étude avec des plants racines nues (RN) de bouleau, les systèmes racinaires étaient faciles et les planteurs ont largement préféré les plants RN par rapport aux godets. Les plants RN permettent d'en mettre plus dans un sac et donc de faire moins d'allers-retours au lieu de ravitaillement en plants. Il est cependant bien précisé que si les plants de RN étaient des chênes, le constat n'aurait sûrement pas été le même.</p> <p>Concernant les plants en godet, les planteurs ont habituellement des crochets pour faire tenir les cagettes de transport et le poids des cagettes les dérange peu.</p>

4. Synthèse et conclusion

Dans le contexte de l'étude, la durée médiane d'un cycle de plantation est influencée par la réalisation préalable d'une PMS, celle-ci diminuant significativement la durée de travail, et par le conditionnement des plants, le godet permettant une mise en terre plus rapide. La modalité sans PMS est celle où le planteur passe le plus de temps sur le travail de plantation proprement dit : 83% du temps dans le témoin sans PSM, contre 65 à 79% dans les modalités avec PMS.

La réalisation d'une PMS permet de diminuer significativement le nombre de coups pour préparer le trou avant la mise en terre du plant par rapport aux modalités sans PMS. Pour les autres actions, aucune différence significative n'est visible. Le ressenti des planteurs coïncide partiellement avec les résultats de l'analyse RULA, en désignant TEM et SSL comme deux modalités qui demandent de répéter les mouvements un peu plus souvent que les autres modalités. Le type de conditionnement des plants a eu un effet sur la répétitivité des mouvements pour le tassement et la réalisation du trou avant la mise en terre des plants. Les plants en racines nues demandent un nombre moins important de coups portés avant la mise en terre mais, à l'inverse, demande un nombre de coups pour le tassement un peu plus élevé. Il est important de noter la remarque des planteurs selon lesquels ce résultat est spécifique au système racinaire du bouleau qui est facile à mettre en terre par rapport à d'autres plants en racines nues qui peuvent être beaucoup plus difficiles à installer.

Le risque estimé de blessure dû à la charge musculosquelettique est considéré moyen sur plus de 75% du temps de l'activité des planteurs et fort sur 3% du temps. Cela implique des changements dans les actions des planteurs, à réaliser rapidement. Le risque négligeable est pratiquement inexistant sur ces actions. La réalisation d'une PMS et le type de conditionnement des plants n'ont pas eu d'effet visible sur le niveau de risque sur les postures que subissent les planteurs. Les ressentis diffèrent fortement selon les planteurs. Le planteur le plus jeune n'a pas senti de réelle différence en termes de gestes et postures entre les modalités avec PMS ou sans PMS. En revanche, le second planteur estime que TEM et SSL entraînent des postures et des gestes plus pénibles.

La phase de tassement est celle qui présente le moins de risque pour le planteur. Selon le côté du planteur et les phases de travail, le niveau de risque diffère. Néanmoins, le niveau de risque est moyen ou fort dans plus de 60% du temps de travail, pour les phases d'avancement, de décapage, travail du sol et de plantation.

Les principales zones du corps sollicitées sont les épaules lors du travail du sol et la plantation, la nuque lors de toutes les étapes, le tronc lors du décapage, le travail du sol et la plantation, et enfin les

poignets lors du travail du sol, la plantation et l'avancement. Dans le questionnaire, le tronc a été identifié pour les deux planteurs. Les épaules et les coudes n'ont été identifiés que par un des planteurs et uniquement sur TEM.

Nos résultats ne montrent donc pas de différences fortes dans les niveaux de risques pour les planteurs entre les modalités avec ou sans PMS, ni entre les plants en racines nues ou en godets. Le broyage général du site a probablement facilité l'ensemble du cheminement et la PMS a permis de réduire la répétition des mouvements sur certaines actions. Quelles que soient les modalités et les phases, les niveaux de risques sont critiques la majorité du temps, indiquant la nécessité d'améliorer les modes de travail et des outils pour diminuer les niveaux de risque.

Dans de futures études, il serait intéressant de compléter les résultats sur les scores RULA et le ressenti des planteurs avec une évaluation de l'effort musculaire et /ou de l'activité cardiaque qui permettrait d'évaluer les niveaux de fatigue induits par chaque phase, de repérer plus précisément au sein de chaque action les mouvements et postures les plus à risque, et d'estimer des effets cumulatifs sur la durée de travail total.

Références bibliographiques

Colney, L., Marques, S., Dardaine, A., François, D., 2020. La Plantation forestière manuelle (Rapport de stage), EG90- Ergonomie et conception avancée. 67p

Friard, O., Gamba, M., 2016. BORIS : a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods Ecol Evol* 7, 1325–1330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584>

Gómez-Galán, M., Callejón-Ferre, Á.-J., Pérez-Alonso, J., Díaz-Pérez, M., Carrillo-Castrillo, J.-A., 2020. Musculoskeletal Risks: RULA Bibliometric Review. *IJERPH* 17, 4354. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124354>

Granzow, R., Schall, M.C., Smidt, M., 2016. Full Shift Physical Activity among Reforestation Hand Planters: A Feasibility Study. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 60, 1018–1021. <https://doi.org/10.1177/1541931213601236>

McAtamney, L., Corlett, E.N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of world-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* 91–99.

Puyal M., Pitaud J. 2022. Evaluation ergonomique de l'acte de plantation. 5p

Puyal M., Boudy M., Collet C., Godard L., 2025. Evaluation ergonomique des travaux forestiers par la méthode RULA : acquisition et traitement des données. Rapport Interne, ONF, INRAE, 36 p.

Slot, Tegan & Dumas, Genevieve. (2010). Musculoskeletal symptoms in tree planters in Ontario, Canada. *Work* (Reading, Mass.). 36. 67-75. 10.3233/WOR-2010-1008.