

# Le porte-outil : facteur déterminant de la productivité horaire de préparation mécanisée du site avant plantation

## Résumé

La suppression des produits phytosanitaires en forêt a entraîné le développement de nombreux outils pour contrôler la végétation concurrente en zone de renouvellement. Ces outils varient par leur conception générale, le travail réalisé et le type de porte-outils associé : tracteur ou pelle. De plus, les stratégies de travaux sont multiples. Elles se définissent par la préparation à réaliser (décapage, décompaction du sol...) et les couples outil-porte-outil utilisés pour la réaliser. La diversité de ces stratégies influe sur la productivité et les performances économiques de celles-ci. Lorsque le forestier définit sa stratégie de travaux, le choix de l'outil et du porte-outil associé découle en partie des coûts associés et donc de la productivité. Ces performances de productivité sont aujourd'hui très peu documentées et on connaît peu les paramètres qui l'influencent (porte-outil, outil, type de travail, ...). Pour éclairer le choix du forestier lors de cette prise de décision et lui fournir des données de référence, nous avons étudié la productivité effective des travaux de préparation mécanisée selon diverses stratégies. Cette productivité effective comprend uniquement le travail actif par la machine et ne prend pas en compte les temps annexes de préparations ou d'incidents. Nos résultats désignent le porte-outil comme le principal paramètre influençant la productivité de la stratégie. Les stratégies comprenant des outils tractés sont plus productives que celles comprenant uniquement des outils portés. La puissance moteur et le poids de la pelle ont un effet positif sur cette productivité. En revanche, le type de travail a moins d'impact sur cette productivité. Pour le gestionnaire, ces résultats originaux jusqu'alors peu documentés doivent être un appui lors de la prise en compte de la productivité dans le choix de sa stratégie technique. Cela ne doit cependant pas être le seul paramètre à prendre en compte. Son choix doit résulter d'une appréciation globale des critères de performances techniques, environnementales et sociales. C'est la combinaison de toutes ces performances, ainsi que la disponibilité effective du matériel et des chauffeurs expérimentés, qui guideront les choix de la stratégie de préparation mécanisée du site.

## Introduction

La plantation forestière est aujourd'hui un outil majeur d'adaptation des forêts aux changements globaux. D'une part, la plantation permet de pallier les dynamiques de régénération naturelle lorsqu'elles sont insuffisantes ou rendues impossibles suite à la disparition des semenciers. D'autre part, l'acte de plantation permet d'installer de nouvelles essences ou provenances mieux adaptées aux conditions stationnelles et climatiques, dans l'immédiat et dans le futur. Selon le contexte de sol et de végétation, il est parfois nécessaire de réaliser des travaux préalables à la plantation pour favoriser la reprise des plants. En ce sens, la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires en forêt privée, et la suppression de leur utilisation en forêt publique, a entraîné le développement de nombreux outils pour contrôler la végétation concurrente lors de travaux préparatoires. Ces outils permettent de réduire les contraintes induites par la végétation concurrente des jeunes plants (compétition pour l'eau, la lumière et les éléments minéraux) et par le sol (compaction, engorgement, sécheresse édaphique).

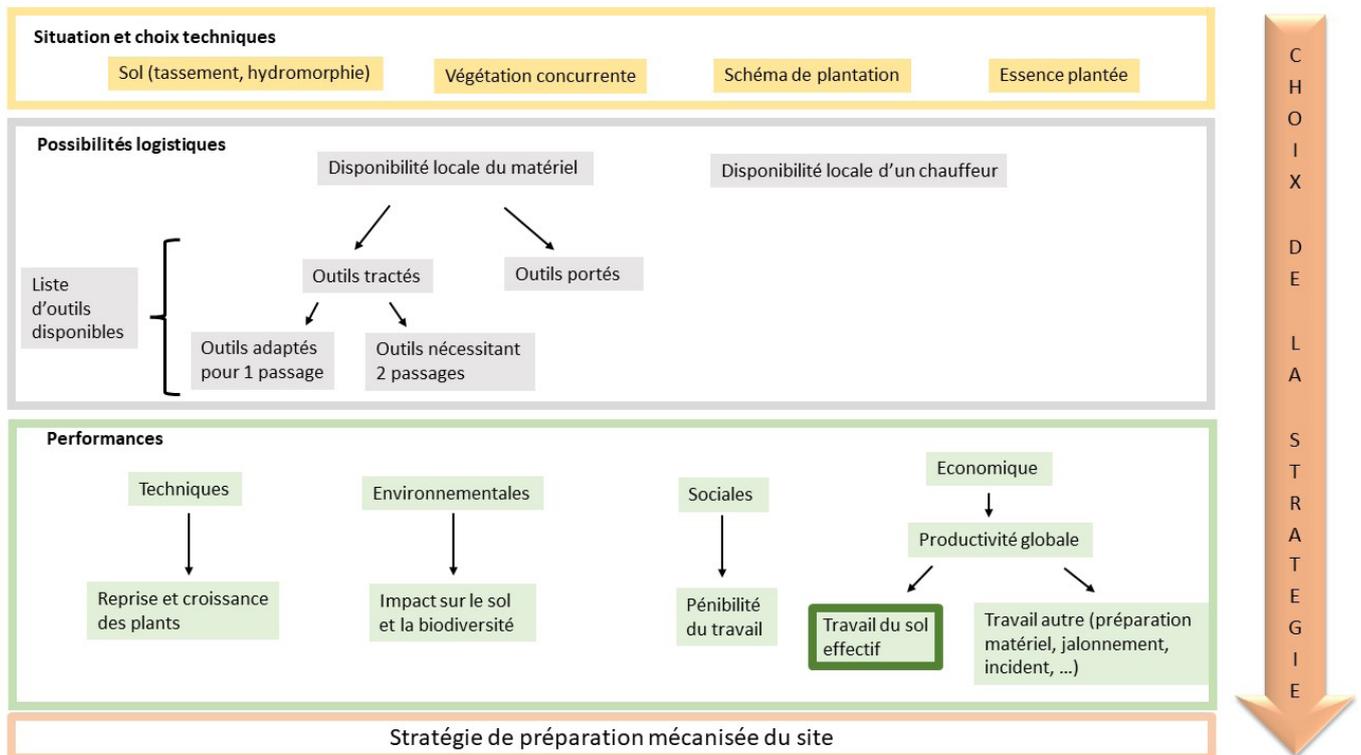
De nombreuses études montrent l'efficacité de la préparation mécanisée du site (PMS) pour contrôler la végétation concurrente. En 2014, Auzuret a montré l'efficacité de l'outil Scarificateur réversible pour le contrôle de la fougère aigle durant trois années suivant la plantation. En 2016, Dassot a montré des résultats similaires pour contrôler la recolonisation de la molinie en milieu hydromorphe. De plus, la réalisation de billons pour surélever les plants de chêne s'est également révélée efficace dans cette étude, dans des zones à engorgement temporaire et sous réserve qu'elle soit associée à un contrôle de la végétation concurrente. Cependant, en 2020, Vast a aussi établi que l'efficacité de la PMS pour réduire les contraintes liées au sol dépendait principalement du niveau d'humidité du sol lors de l'intervention, de la dextérité ou de l'expérience de l'opérateur, du contexte pédologique et du type de végétation.

Pour contrôler les facteurs limitant le renouvellement, le forestier dispose de différentes stratégies techniques, à objectifs variés. Une stratégie se définit par le type de préparation à réaliser et les outils associés. La préparation peut concerner la gestion des rémanents et de la végétation, avec les actions de déblaiement, de mise en andain, de broyage, ou de décapage par arasement ou par arrachage. Elle peut concerner la décompaction du sol, réalisée uniquement sur les horizons superficiels (~25cm) ou en profondeur (~60cm) ou enfin limiter les effets d'engorgement en réalisant un billon de sol surélevé sur lequel les plants seront installés. Selon les stratégies choisies, les outils utilisés peuvent être spécifiques à un type de préparation (par ex. : décapage) là où d'autres peuvent en combiner plusieurs (par ex. : décapage de la végétation et décompaction du sol). Le nombre de passages de la machine peut aussi être différent selon la stratégie choisie. Celle-ci peut nécessiter le passage de plusieurs outils différents ou d'un même outil plusieurs fois comme, c'est le cas par exemple avec le sous-soleur déporté.

Les outils se différencient à la fois par leur conception générale (avec la présence d'un râteau, de dents de sous-solage, de disques, d'un nombre différent d'éléments) et par le porte-outil associé, pelle ou tracteur (tableaux 1, 2 et 3). Chaque outil est spécifique d'un type de porte-outil. Les outils tractés sont intégrés à l'attelage d'un tracteur là où

les outils portés sont attachés sur le bras d'une pelle. De la même manière que pour les outils, il existe une importante variabilité au sein des porte-outils, dans le tonnage, la puissance ou encore les dimensions.

Cette diversité d'outils, de porte-outils et de préparation du site influe sur la productivité et par conséquent sur les performances techniques et économiques de la stratégie. Lors de la mise en œuvre d'une préparation mécanisée du sol, le choix de l'outil et du porte-outil associé découle de la situation sur le terrain, des choix techniques du forestier, des possibilités logistiques et des performances de l'outil, qu'elles soient techniques, environnementales, sociales ou économiques. La productivité de l'outil et du porte-outil associé sont déterminants pour la performance économique (Figure 1). Mais cette productivité est aujourd'hui très peu documentée dans la littérature et on connaît peu les paramètres qui vont l'influencer (porte-outil, outil, type de travail, ...). Pour éclairer le choix du forestier lors de cette prise de décision et lui fournir des données de référence, nous avons étudié les performances techniques de diverses stratégies. Pour cela, les productivités horaires d'une large gamme d'outils, associé à leur porte-outil et pour différents types de travaux, ont été comparées. Cette étude mobilise les données issues d'un réseau expérimental mis en place pour évaluer les performances multiples de différents types d'outils et porte-outils.

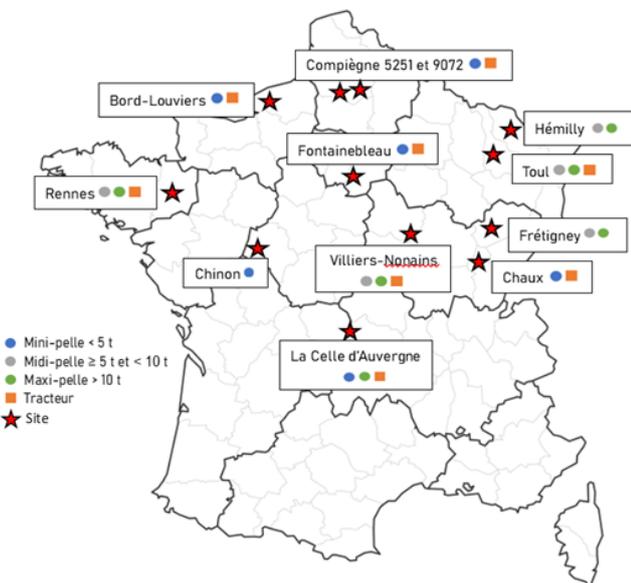


↑ **Figure 1.** Éléments à prendre en compte pour établir la stratégie de préparation mécanisée du sol

## Le réseau PILOTE : diversité des outils et des conditions stationnelles

Le réseau expérimental PILOTE est un réseau multipartenarial INRAE, ONF, FCBA, CNPF, SF-CDC et F&BE, dont l'installation du dispositif a débuté en 2012 et se poursuit actuellement. Douze sites composent le réseau, répartis entre le centre et le nord de la France (Figure 2). Les dispositifs expérimentaux ont été installés dans des contextes de végétation très divers (graminées, ronces, fougère aigle, ligneux) et dans une large gamme de textures de sol (du sablo-limoneux jusqu'au sol argileux). Les parcelles ont été plantées en plein, avec des essences de reboisement traditionnelles (chêne sessile, douglas, pin sylvestre). Le descriptif détaillé de chaque dispositif est disponible sur la page du réseau PILOTE du site web du pôle RENFOR. (Lien [ici](#))

Sur chaque site expérimental, entre deux et cinq couples outils et porte-outils ont été testés. Le choix des méthodes de PMS était propre à chaque dispositif. Un diagnostic des principaux facteurs pouvant limiter l'installation des plants (encombrement par les rémanents, végétation compétitrice, végétation sèche, compaction du sol, engorgement) a tout d'abord été effectué. Les stratégies de PMS ont ensuite été choisies selon les travaux à réaliser, l'essence plantée, le schéma et la densité de plantation, la disponibilité locale du matériel de PMS et les enjeux locaux présents.



↑ **Figure 2.** Localisation des dispositifs du réseau PILOTE

Ces stratégies se différencient par le matériel utilisé et par la préparation réalisée :

- Porte-outil : tracteur ou pelles (de trois tailles différentes : mini, midi et maxi, voir tableau 1) ;
- Outil : Sept outils tractés (sur tracteur) et huit outils portés (sur pelles) ;
- Type de préparation : andainage des rémanents, déblaiement des rémanents, décapage de la végétation de surface, broyage des rémanents, travail du sol (décompactation en surface, en profondeur, par griffage, par bêchage, billonnage du sol) ;
- Mise en œuvre : préparation en ligne ou en potet, nombre de passages successifs des machines dans le cas d'une préparation en ligne (plusieurs passages successifs sur la ligne d'un couple outil-porte-outil avec la même méthode, plusieurs passages successifs sur la ligne de différents couple outil-porte-outil et différentes méthodes).

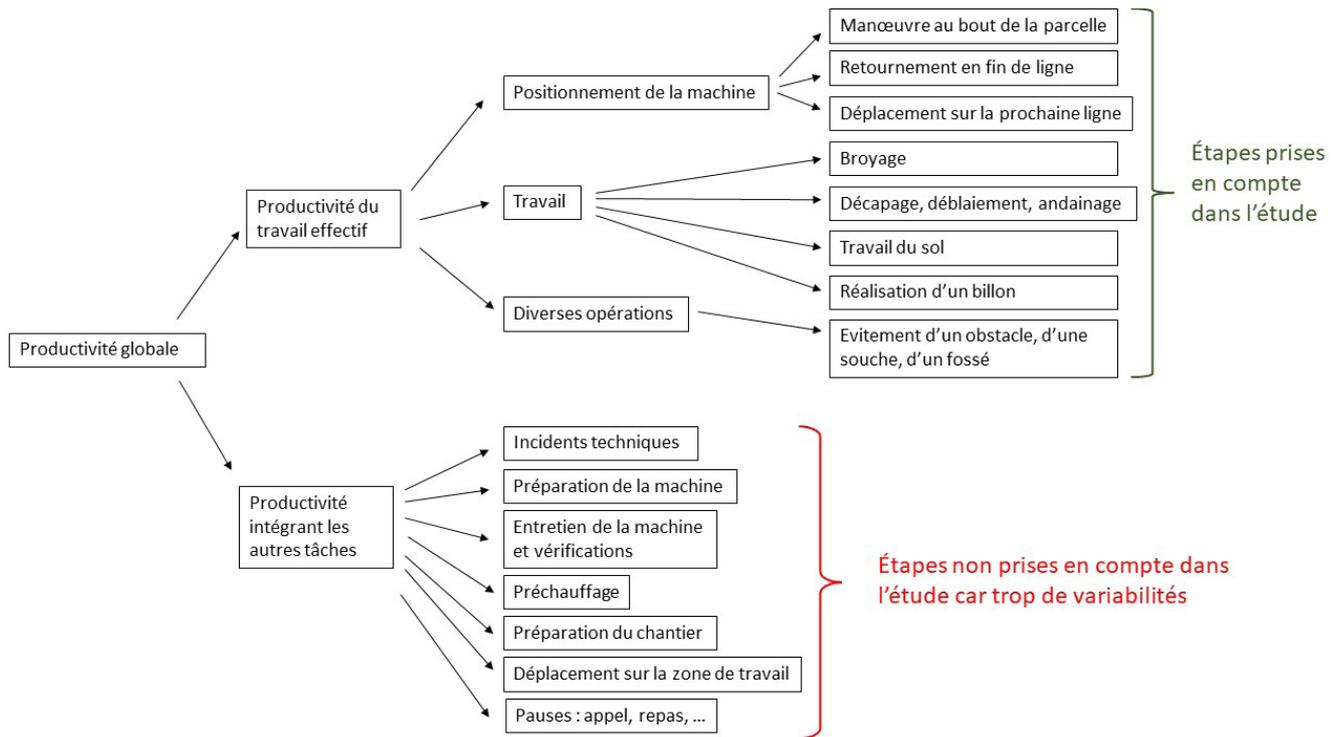
Les outils, les porte-outils et les préparations associées sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

Dans l'analyse, les stratégies de PMS mises en œuvre ont été regroupées selon le type de porte-outil utilisé et selon le type de préparation réalisée.

## Mesures effectuées : caractérisation du matériel et chronométrage des travaux

A son arrivée sur le chantier, l'opérateur consacre du temps à la préparation de la machine et de l'outil avec la maintenance, l'entretien, la vérification du matériel, le préchauffage, etc. Il consacre aussi du temps à la préparation du chantier avec le jalonnement des lignes, le déplacement sur la zone de travail, etc. Ces phases de travail sont nécessaires au bon déroulement du chantier. Au cours du travail du sol en lui-même, que l'on appellera travail effectif, l'opérateur peut aussi faire face à des imprévus, comme un incident sur la machine ou l'outil, qui impacteront fortement la productivité du chantier. Le travail global correspond au travail effectif de la machine auquel on ajoute toutes ces étapes.

Obtenir une estimation robuste de la productivité globale est cependant délicate et demande un grand nombre de chantiers en raison de sa forte dépendance aux conditions de mise en œuvre des chantiers (complexité, aléas du chantier, durée de chronométrage). Afin de comparer les différentes méthodes, nous avons donc choisi d'analyser uniquement le travail dit « effectif ». Il est important de garder en tête que cette productivité du travail effectif sera toujours plus élevée que la productivité du travail globale, plus proche de la réalité d'un chantier (Figure 3).



↑ **Figure 3.** Distinction entre productivité du travail effectif et productivité globale

Pour les schémas en ligne comme en potet, le travail effectif correspond aux phases suivantes :

- Positionnement de la machine : manœuvre en bout de parcelle de la machine, retournement en fin de ligne, déplacement sur la prochaine ligne ;
- Travail : broyage, décapage de la végétation, travail du sol, réalisation d'un billon ;
- Diverses opérations : évitement d'une souche ou d'un autre obstacle.

Pour chaque stratégie évaluée, un chronométrage distinguant ces différentes phases a été réalisé par un opérateur qui suivait la machine réalisant le travail de PMS. En parallèle, la distance parcourue par la machine a été mesurée dans le cas d'un travail en ligne et le nombre de potets réalisés a été compté dans le cas des travaux localisés.

Au total, nous avons retenu 115 heures de chronométrages de travail effectif pour 53 stratégies évaluées. La durée médiane traitée par stratégie est de 1h45 et varie entre 15 min et 8h en fonction de la taille des parcelles disponibles pour les mesures.

A partir des données de chronométrage, de distance travaillée et du nombre de potets réalisés, nous avons estimé une productivité horaire en mètres linéaires par heure ou en potets par heure.

Pour chaque matériel chronométré, la marque, le modèle, le poids ont été renseignés. Le poids correspond à celui fourni par le constructeur. Il ne prend pas en compte le poids du blindage additionnel qui se situe généralement entre 2 et 4 tonnes. Pour les tracteurs nous avons noté la puissance du moteur. Dans l'analyse des performances, les tracteurs sont caractérisés par leur puissance moteur et les pelles par leur poids (leur puissance est directement proportionnelle au poids), selon l'usage en foresterie. Les pelles sont classées en trois catégories : mini-pelle (moins de 5 tonnes), midi-pelle (5 à 10 tonnes) et maxi-pelle (10 tonnes et plus). Dans le cas des tracteurs, certains outils sont utilisés de manière répétée pour réaliser le travail demandé. Les tracteurs sont classés en deux catégories en fonction de leur nombre de passage sur la ligne pour réaliser le travail : tracteur 1 passage et tracteur 2 passages.

Les résultats détaillés par outil et par chantier ainsi que des mesures complémentaires sont présentés dans Puyal et al. (2022). Nous présentons ici une synthèse de ces résultats.

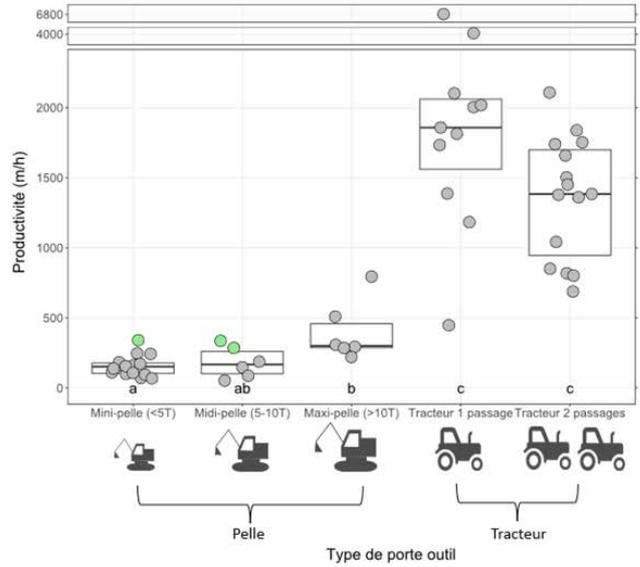
## Un lien direct entre porte-outils et productivité

Nous avons cherché à comprendre le rôle du porte outil, de type pelle ou tracteur, sur la productivité horaire du travail. Pour cela, nous avons représenté la productivité horaire par type de porte outil (Figure 4).

Des différences majeures apparaissent entre les types de porte-outils. Le graphique de gauche de la figure 4 montre que la productivité médiane des outils tractés est significativement supérieure, avec 1 580 m/h, par rapport à la productivité médiane des pelles, avec 172 m/h. Lorsque l'on regarde plus en détail avec le graphique de droite de la figure 4, on constate qu'au sein de la catégorie pelle, la productivité de la maxi-pelle est significativement supérieure, avec 300 m/h, par rapport à la productivité médiane de la mini-pelle, avec 152 m/h.

Au sein de la catégorie pelle, on constate aussi que le travail en maxi-pelle augmente la productivité médiane de 80 % par rapport au travail avec une midi-pelle. Cet écart de productivité n'est cependant pas significatif. Le faible nombre de points dans certaines catégories de porte-outil illustre la difficulté de l'exercice pour récupérer des données ainsi que la forte variabilité des résultats au sein d'une même catégorie de porte-outils. Celle-ci est liée à la variabilité des outils, porte-outil et des chantiers où ils ont été mis en œuvre. Cela montre la complexité de l'analyse et explique ces résultats non significatifs. Il en est de même au sein de la catégorie tracteur où le travail en double passage semble diminuer la productivité médiane de 35 % par rapport au travail par simple passage mais n'est pas montré statistiquement. Dans ce dernier cas, il est important de rappeler que le résultat final du travail réalisé pour le tracteur en simple ou deux passages ne sera pas le même et que ce constat ne doit pas mener à restreindre les travaux au seul simple passage.

Enfin, on constate que le type de travail affecte la productivité : au sein des PMS réalisées avec des mini ou midi-pelles, une préparation continue sur la ligne (points gris en Figure 4) montre une moins bonne productivité que la préparation en potets (point vert en Figure 4) qui parcourt la même distance mais diminue le linéaire travaillé.

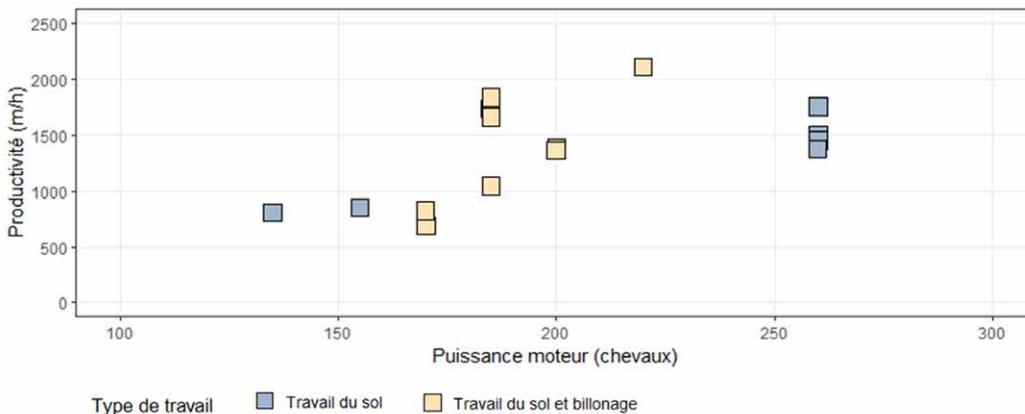


↑ **Figure 4.** Productivité effective, en mètres linéaires par heure, en fonction du poids du porte-outil pour les pelles et du nombre de passage pour les tracteurs. Chaque point représente un couple outil-porte-outil évalué sur un dispositif pour un type de travail. Un point vert représente un schéma de travail par potet sur la ligne, un point gris représente un schéma de travail en ligne complète. Le trait inférieur de la boîte représente le 1<sup>er</sup> quartile (25 % des valeurs se situent en dessous de ce trait), le trait central représente la médiane (50 % des valeurs se situent en dessous de ce trait) et le trait supérieur représente le troisième quartile (75 % des valeurs se situent en dessous de ce trait). Les lettres présentent les résultats de tests de comparaison statistique (les groupes indexés par une même lettre ne sont pas statistiquement différents selon un test de Wilcoxon).

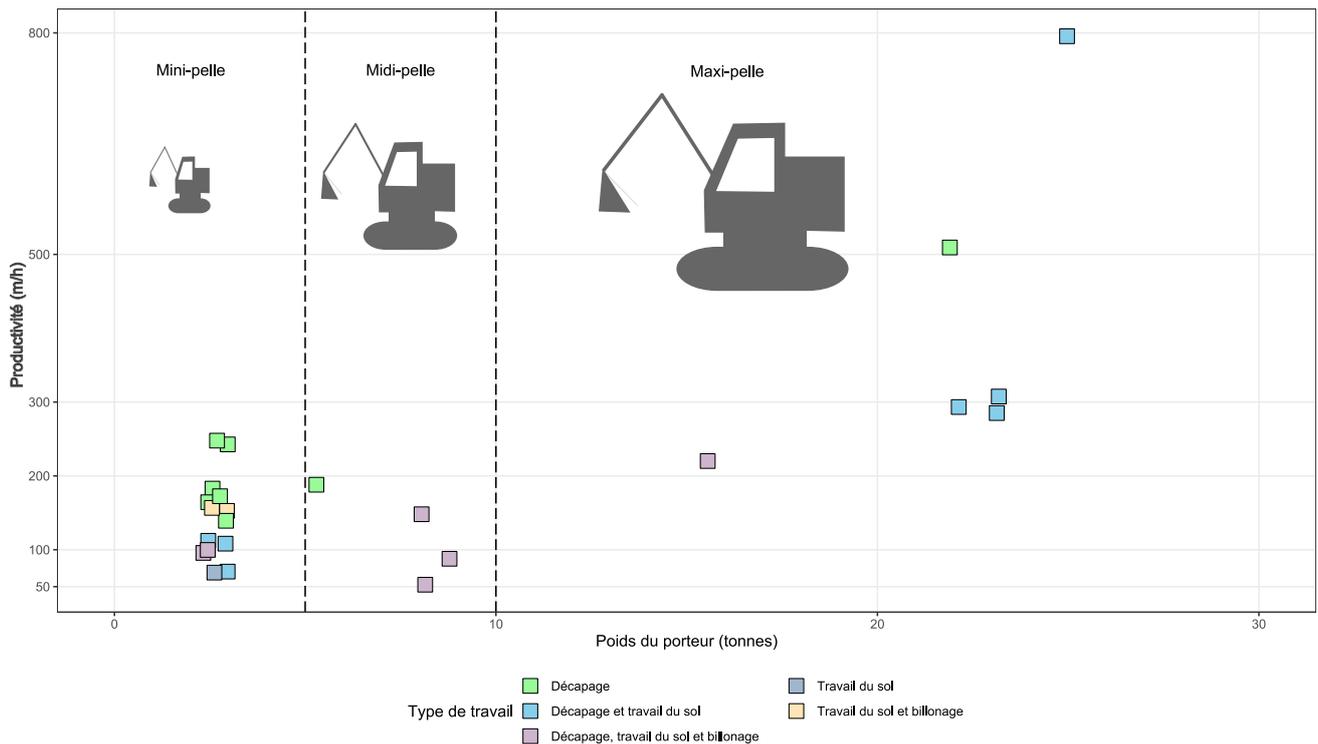
## Une relation entre puissance moteur, poids, type de travail et productivité ?

Dans un second temps, nous avons cherché à savoir si une relation existait entre la productivité horaire et la puissance des porte-outils, et si le type de préparation (décapage, travail du sol, billonnage, combinaison de travaux) avait une influence sur cette productivité.

Pour les tracteurs, nous avons représenté la productivité horaire en fonction de la puissance moteur.



← **Figure 5.** Productivité effective, en mètres linéaires par heure, en fonction de la puissance du moteur du tracteur pour un travail en ligne avec double passage. Le type de travail réalisé est représenté par les couleurs des points.



↑ **Figure 6.** Productivité effective, en mètres linéaires par heure, en fonction du poids du porte-outil pour les pelles pour un travail en ligne. Le type de travail réalisé est représenté par les couleurs des points. Les traits en pointillé indiquent les limites des catégories mini/midi/maxi.

Il faut noter que 90 % des tracteurs en simple passage sur la ligne ont des puissances moteurs comprises entre 155 et 185 chevaux. Cette faible diversité de puissance moteur ne permet pas d'observer de relation avec la productivité horaire. Afin d'alléger la figure 5, seuls les résultats des stratégies de tracteur avec deux passages sur la ligne sont représentés car elles présentent une plus grande diversité de puissances moteur. Une tendance positive entre puissance moteur et productivité semble se dessiner dans ce cas. Plus la puissance moteur augmente et plus la productivité augmente. On ne peut en revanche rien conclure quant à l'effet du type de travail sur la productivité compte tenu du fait du manque de type de travaux différents évalués pour une même puissance moteur.

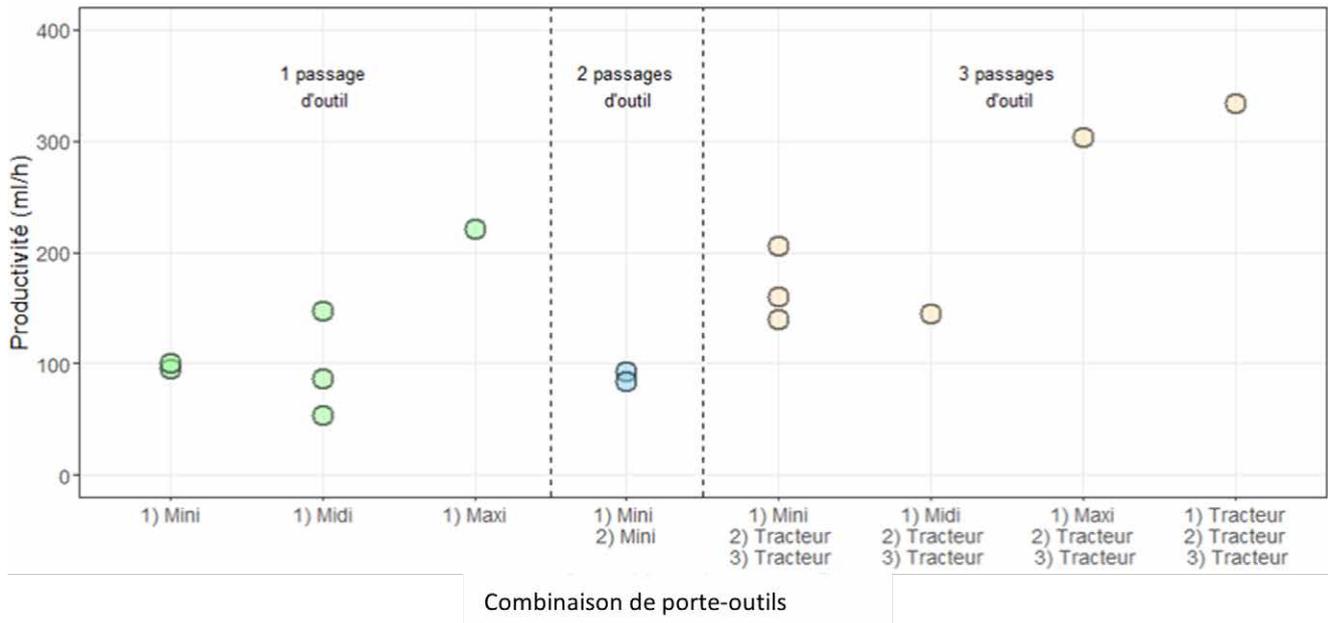
Nous avons ensuite réalisé le même travail pour les pelles, en traçant la productivité horaire en fonction du poids de la pelle.

On retrouve dans la figure 6 une tendance positive entre le poids des porte-outils et la productivité, ce qui rejoint les résultats observés dans la figure 4. Lorsque le poids de la pelle augmente, la productivité augmente. Cependant, au sein de chaque catégorie de pelle (mini/midi/maxi), on n'observe pas de relation entre le poids et la productivité, principalement dû à la faible répartition des poids au sein d'une même catégorie.

En complément, lorsque l'on regarde pour un même poids de porte-outil, notamment dans la catégorie mini-pelle où un grand nombre d'observations est disponible, l'augmentation du nombre d'actions réalisées entraîne une diminution de la productivité. Un travail de décapage est alors plus productif qu'un travail plus complexe comprenant par exemple du décapage et du travail du sol.

## Une stratégie à plusieurs passages est-elle moins productive qu'une à un seul passage pour un même travail réalisé ?

Certaines préparations multiples (ex : décapage et travail du sol) peuvent être réalisées selon des stratégies très différentes pour un résultat proche. Ces stratégies se distinguent par le nombre de passages, le type d'outils et le type de porte-outils utilisés. La figure 7 détaille l'effet de ces actions multiples sur la productivité de la stratégie de PMS pour une même préparation qui combine décapage, travail du sol et billonnage en ligne. Différentes stratégies, faisant intervenir différents couples outils-porte-outils et avec 1, 2 ou 3 passages successifs, permettent de réaliser cette même préparation :



↑ **Figure 7.** Productivité effective (en mètres linéaires par heure) sur une préparation comportant décapage, travail du sol et billonnage en ligne, en fonction de l'assemblage des porte-outils utilisés. Les lignes en pointillés indiquent le nombre de passages réalisés avec les porte-outils sur la préparation complète. Les points verts, bleus et jaunes correspondent à une préparation comprenant respectivement 1, 2 ou 3 passages d'outil.

- Stratégie avec 1 passage d'outil : (i) Sous-soleur multifonctions monté sur mini-pelle (réalise en un passage le décapage, travail du sol et billonnage) ; (ii) Sous-soleur multifonctions monté sur midi-pelle (décapage, travail du sol et billonnage) ; (iii) DB10 monté sur maxi-pelle (décapage, travail du sol et billonnage)
- Stratégies avec 2 passages d'outil : (i) Razherb monté sur mini-pelle (réalise le décapage en un passage) suivi de sous-soleur multifonctions monté sur mini-pelle (réalise le travail du sol et billonnage en un passage)
- Stratégies avec 3 passages d'outil : (i) Razherb monté sur mini-pelle (réalise le décapage en un passage) suivi de culti-3B tracté en 2 passages (réalise le travail du sol et billonnage en deux passages) ; (ii) Razherb monté sur midi-pelle (décapage) suivi de culti-3B tracté en 2 passages (travail du sol et billonnage) ; (iii) Râteau-Pompéï monté sur maxi-pelle (décapage) suivi de culti-3B tracté en 2 passages (travail du sol et billonnage) ; (iv) Mericrusher tracté (décapage) suivi de culti-3B tracté en 2 passages (travail du sol et billonnage)

Il faut noter que les stratégies évaluées comportant 1 ou 2 passages d'outils utilisent exclusivement des pelles.

Pour un même travail réalisé qui comprend un décapage, un travail du sol et un billonnage, on constate que les stratégies avec les meilleures productivités sont celles qui utilisent uniquement des tracteurs, ou des tracteurs et une maxi-pelle (figure 7), alors que l'on augmente le nombre de passages dans ces stratégies. Les stratégies uniquement avec pelle sont moins productives que les stratégies qui associent la même catégorie de pelle avec des passages de tracteurs (ex : 1 passage de mini pelle est moins productive que 1 passage de mini-pelle associée à 2 passages de tracteur).

Avec les outils actuellement disponibles, le recours au seul porte-outil tracteur pour la réalisation de travaux préparatoires complexes combinant décapage, travail du sol et billonnage, impliquera nécessairement trois passages. Cela nécessitera parfois plusieurs couples outil-porte-outil. Dans ce cas, le gain de productivité lié à l'utilisation du tracteur est probablement en partie perdu par une complexification de l'organisation du chantier. En revanche, avec les pelles, même si la productivité reste plus faible, certains outils actuellement disponibles 3 en 1 (Sous-soleur multifonction, ModulD, DB10) permettent de limiter le nombre de passages et d'outils utilisés et donc de simplifier le chantier.

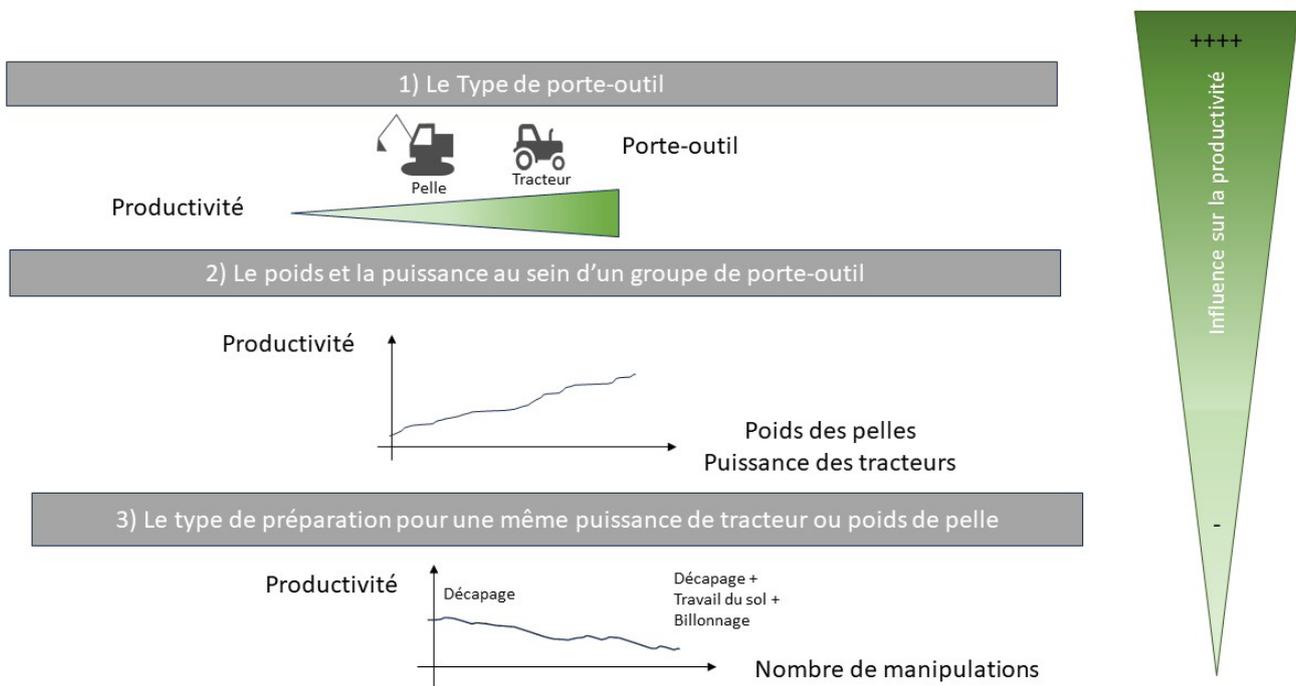
## Des résultats originaux

Ce travail pionnier dans l'estimation de la productivité horaire des méthodes de PMS apporte des premiers éléments originaux permettant de comparer différentes méthodes de PMS. Les différents résultats sont synthétisés dans la figure 8.

Bien que le jeu de données soit hétérogène en termes de type de chantier, de type d'outils et de porte-outils testés, regrouper les données par catégorie de porte-outil, pour différents outils, dispositifs et types de préparation, nous a permis de mettre en lumière les principaux facteurs qui semblent influencer la productivité horaire de la PMS. Très peu de données chiffrées sont disponibles à ce jour dans la littérature française et internationale sur la productivité des PMS. La majorité des travaux analysant la productivité horaire des opérations mécanisées en forêt se concentrent sur la phase de récolte des bois. Ce travail vient apporter des données chiffrées nouvelles sur cette étape de travaux préparatoires à la plantation jusqu'alors peu documentée. Il fournit des gammes de résultats pour une large diversité de stratégies. Pour rappel, ce travail s'est basé sur 12 sites, 15 outils, 19 porte-outils et 53 chronométrages de préparations mécanisées de site, avec un protocole commun de mesure. La diversité des outils testés, des engins utilisés, des conducteurs suivis et des contextes stationnels donne

une grande force à ces résultats qui viennent compléter les références existantes en fournissant des gammes de productivité pour les porte-outils. Pour rappel, les résultats présentés sont issus du chronométrage du travail effectif et ne prennent pas en compte les aléas des chantiers qui impacteraient cette productivité (Figure 3).

Grâce à cette étude, on peut conclure que le principal facteur influençant la productivité de la stratégie est le type de porte-outil. Les outils tractés sont bien plus productifs que les outils montés sur pelle, quel que soit le type de travail réalisé. La présence d'un tracteur dans les stratégies combinant tracteur et pelle améliore la productivité de la stratégie, pour un même type de travail réalisé lorsque l'on compare à des stratégies uniquement avec pelle. Dans le cas de ces chantiers impliquant des combinaisons de couple outil-porte-outil, le gain de productivité apporté par l'utilisation des tracteurs reste cependant contrebalancé par la complexité organisationnelle des chantiers. Le gain de productivité peut finalement être jugé faible et ne permet pas de considérer ces stratégies comme meilleures par rapport à celles mobilisant un outil multifonction monté sur pelle, alors plus simples à organiser. Enfin, nous avons pu montrer qu'une relation existe entre poids ou puissance moteur et productivité au sein d'un même type de porte-outil et que finalement, le type de travail réalisé n'influence que légèrement cette productivité.



↑ Figure 8. Synthèse des facteurs techniques influençant la productivité de la PMS

## Vers une évaluation multicritère des méthodes de PMS

Dans notre étude, nous avons exprimé la vitesse de réalisation du travail en termes de productivité horaire. La productivité est un indicateur des coûts associés à ces prestations. Ces nouveaux résultats synthétiques doivent permettre de mieux prendre en compte ce paramètre dans l'appréciation globale du choix de l'itinéraire technique. Cependant, la productivité n'est pas le seul critère à intégrer dans le choix de l'itinéraire technique et les critères de performances techniques (reprise et croissance des plants), environnementales (impact sur le sol et la biodiversité) et sociales (pénibilité du travail pour les opérateurs) doivent prédominer. C'est la combinaison de toutes ces performances, ainsi que la disponibilité effective du matériel et des chauffeurs expérimentés, qui guident les choix de la méthode de PMS (Figure 1).

Le réseau expérimental PILOTE qui a servi de support à cette étude est un réseau actif qui continue de se développer avec l'installation de nouveaux dispositifs. La diversité des outils testés, des engins utilisés, des conducteurs suivis et des contextes stationnels donne une grande force à ce réseau. Des mesures complémentaires au chronométrage des machines sont réalisées dans les dispositifs de ce réseau depuis sa mise en place (durée de la mise en terre des plants, survie et croissance des plants, structure du sol après PMS, pénibilité des travaux pour les opérateurs). Ces mesures permettront à terme d'enrichir les résultats présentés sur la productivité de la PMS et seront intégrés dans une évaluation multicritère de la PMS.

	Poids (en tonnes)	Puissance (en chevaux)	Vue de la machine
Mini-pelle	2.7 à 2.8 T	24 à 28cv	 © L. Godard, INRAE
Midi-pelle	5 à 8.5 T	49 à 55 cv	 © M.Puyal, INRAE
Maxi-pelle	15.4 à 25 T	115 à 180 cv	 © N. Dumas, INRAE
Tracteur	6 à 10 T*	135 à 260 cv	 © N. Dumas, INRAE

↑ **Tableau 1.** Porte-outils étudiés : poids, puissance et vue de la machine.

Outil	Outils tractés						
	Charrue bidisques motorisée	Charrue Deltasol	Culti-3B	Meri-Crusher	Sous-soleur simple	Sous-soleur déporté	Sous-soleur 2 rangs
Poids du porte-outil*	10 T	10 T	6 à 10 T	6 T	6 T	6 T	10 T
Puissance moteur du porte-outil	260 cv	160 cv	170 à 220 cv	175 cv	155 à 185 cv	135 à 155 cv	220 cv
Type de préparation	Travail du sol	Travail du sol	Travail du sol billonnage	Broyage fin	Travail du sol	Travail du sol	Travail du sol
Zone préparée	Ligne	Ligne	Ligne	Ligne	Ligne	Ligne	Ligne
Nombre de passages de l'outil sur la ligne	2	1	2	1	1	2	1
Vue de l'outil	 © E. Ulrich, ONF	 © C. Vidal, CNPF-IDF	 © E. Ulrich, ONF	 © E. Ulrich, ONF	 © N. Dumas, INRAE	 © N. Dumas, INRAE	 © C. Vidal, CNPF-IDF
Dispositif où l'outil est testé	Bord-Louviers Compiègne 5251 Compiègne 9072 Fontainebleau	Celle d'Auvergne	Bord-Louviers Celle d'Auvergne Chaux 1026 Chaux 212 Chinon Frétigny Rennes	Chaux 212	Bord-Louviers Compiègne 5251 Compiègne 9072 Fontainebleau Frétigny Villiers-Nonains	Toul Villiers-Nonains	Celle d'Auvergne

↑ **Tableau 2.** Outils montés sur des tracteurs étudiés : porte-outils utilisés, préparation réalisée, dispositifs expérimentaux où l'outil a été testé et vue de l'outil  
\* Ne prend pas en compte le poids du blindage additionnel. D'expérience le poids additionnel se situe entre 2 et 4 tonnes.

Outils	Outils portés							
	Bident Maillard	DB10	Dent Bertrandie	ModulD	Sous-soleur multifonctions	Râteau Pompéï	Razherb	Scarificateur réversible
Poids du porte-outil	22 T	8 à 15 T	25 T	8 T	3 à 6 T	22 T	3 à 6 T	3 T
Type de préparation	Déblaiement Travail du sol	Décapage Travail du sol Billonnage	Travail du sol	Décapage Travail du sol Billonnage	Décapage Travail du sol Billonnage	Décapage Andainage	Décapage	Décapage Travail du sol
Zone préparée	Ligne	Ligne	Ligne	Ligne Placeau	Ligne Potet	Ligne	Ligne	Ligne
Nombre de passages de l'outil sur la ligne	1	1	1	1	1	1	1	1
Vue de l'outil	 © N. Dumas, INRAE	 © N. Dumas, INRAE	 © C. Vidal, CNPF-IDF	 © C. Collet, INRAE	 © L. Wehrlen, INRAE	 © L. Wehrlen, INRAE	 © L. Wehrlen, INRAE	 © L. Wehrlen, INRAE
Dispositif où l'outil est testé	Frétagney Toul Villiers-Nonains	Hémilly Toul	Celle d'Auvergne	Hémilly Toul	Celle d'Auvergne Chaux 1026 Chaux 212 Chinon Compiègne 5251 Compiègne 9072 Frétagney Rennes Villiers-Nonains	Rennes	Chaux 1026 Chaux 212 Chinon Compiègne 5251 Compiègne 9072 Fontainebleau Rennes	Bord-Louviers Fontainebleau

↑ **Tableau 3.** Outils montés sur des pelles étudiés : porte-outil utilisé, préparation réalisée, dispositifs expérimentaux où l'outil a été testé et vue de l'outil

**Malaurie Puyal**

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

**Catherine Collet**

INRAE – Sylva-RENFOR

**Jonathan Pitaud**

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

**Erwin Ulrich**

ONF – Direction Forêts et Risques Naturels

**Vincent Boulanger**

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

**Noé Dumas**

INRAE – Sylva-RENFOR

**Christophe Vidal**

CNPF – Institut pour le Développement Forestier

**Emila Akroume**

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

## RÉFÉRENCES

- Puyal M., Agro C., Collet C., Dumas N., Pitaud J., Vidal C. 2022. Productivité horaire de la préparation mécanisée du site avant plantation : premiers résultats du réseau Pilote. <https://www6.inrae.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation/PILOTE>
- Dassot, M., Collet, C., Girard, Q., Gibaud, G., Piat, J., Wehrlen, L., Richter, C., Fraysse, J.Y., 2016. Méthodes alternatives de contrôle de la molinie et de préparation du sol pour réussir les plantations. *Rendez Vous Techniques de l'ONF* n°50, p. 3-10.
- Auzuret, X., Gibaud, G., Piat, J., Collet, C., Wehrlen, L., Richter, C., Girard, Q., Fraysse, J.Y., 2014. Contrôler la fougère aigle sans asulame : quelles méthodes alternatives pour réussir les plantations ? *Rendez Vous Techniques de l'ONF* n°43, p. 22-32.
- Vast F., Collet C., Koller R., Pousse N., 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. *Rendez-vous techniques de l'ONF* n°63-64, p. 57-64.

