

t

RenD ez-Vous e c h n i q u e s

n° 54 hiver 2017

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable



Connaissances
p. 9

*Suivre l'effet des prélèvements
de biomasse sur les sols*

Dossier
p. 23

*Tassement, orniérage
et machinisme forestier*



Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Myriam Legay, Patrice Mengin-Lecreulx
(et autres correspondants)

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF – Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture :

En haut : INRA-BEF

En bas : Erwin Ulrich, ONF

Périodicité : 4 numéros ordinaires par an
(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

[http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/
Publications ONF/Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/ Publications ONF/Périodiques))

Renseignements

ONF – documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : documentalistes@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : juillet 2017

sommaire

n° 53 - automne 2016

3

Méthodes

La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent de lever des blocages de régénération naturelle

par Mathieu Dassot, Alexandre Frauenfelder, Léon Wehrlen, Catherine Collet

9

Connaissances

Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers

par Emila Akroume, Bernd Zeller, Marc Buée, Laurent Saint-André, Arnaud Reichard, Christine Gehin et Cyrille Bach

23

Dossier Pratiques

Tassement, orniérage, machinisme forestier et organisation des exploitations en forêts feuillues de plaine et collines

éditorial

Les forestiers sont souvent représentés les yeux tournés vers le ciel, à scruter les fûts et les houppiers des arbres... Mais ils ont aussi les pieds ancrés dans la terre, car la vitalité des forêts passe d'abord par le sol. Le sol, grand travailleur de l'ombre, milieu discret et longtemps méconnu quand bien même les forestiers n'ont pas attendu 2015, « année internationale des sols », pour s'en préoccuper. Gardons donc les yeux rivés sur ce sol pour ce numéro 54 des Rendez-vous techniques.

En contexte de changements globaux, la société compte de plus en plus sur les arbres et la forêt comme source d'énergie et matériaux renouvelables, sans oublier les autres services écosystémiques. Il faut donc récolter du bois -et plus largement de la biomasse- sans détériorer les sols. Ce qui soulève deux grandes interrogations.

L'une concerne la façon dont les sols et peuplements forestiers tempérés réagissent, sur le long terme, aux prélèvements de biomasse ; question cruciale et complexe, encore insuffisamment explorée jusqu'ici. Pour pallier ce manque, l'INRA a mis en place un réseau expérimental original et ambitieux dont on attend beaucoup pour les années à venir. S'il est encore trop tôt pour qu'il porte ses fruits, la conception même de ce dispositif a déjà quelque chose de très instructif.

L'autre interrogation porte plus concrètement sur la pratique des exploitations : dans le contexte socio-économique actuel, comment réduire l'impact des engins et ménager les sols forestiers sensibles au tassement ? Notre dossier fait le point des connaissances actuelles, des évolutions « vertueuses » du machinisme, et des conséquences opérationnelles en termes d'organisation.

Que dire enfin du thème qui fait l'ouverture de ce numéro ? Que même s'il concerne des situations critiques de blocage de la régénération naturelle par une végétation concurrente trop présente, les solutions passent aussi en partie par le sol. Plus exactement par des outils qui permettent de travailler localement le sol sans le bouleverser, tout en éliminant cette végétation.

Le Directeur Forêts et Risques Naturels
Albert MAILLET

La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent de lever des blocages de régénération naturelle

La compétition exercée par la végétation herbacée rend souvent difficile le renouvellement des peuplements forestiers par régénération naturelle, et peut conduire à des situations de blocage partiel ou total. Cet article présente les résultats de l'équipe MGVF de l'INRA de Nancy, qui, en partenariat avec l'ONF Alsace, expérimente des méthodes mécaniques innovantes d'élimination de la végétation concurrente et de préparation simultanée du sol. Objectif : réussir l'installation et la croissance de la régénération naturelle dans les peuplements de moyenne montagne dominés par les éricacées et les graminées.

Le renouvellement des peuplements forestiers par régénération naturelle est une pratique sylvicole majeure. Cette méthode permet généralement de constituer un peuplement de qualité adapté aux conditions locales, mais peut être confrontée à des phénomènes de blocage, indépendamment des problèmes d'ongulés sauvages. L'installation et la croissance des semis dépendent en effet de nombreux facteurs, une régénération naturelle réussie étant le résultat d'un processus qui intègre la production de graines par les semenciers, leur germination au sol, ainsi que la compétition entre les semis, la végétation spontanée et le peuplement adulte.

Le premier facteur de réussite réside dans la proximité et la quantité des semenciers, les graines produites se dispersant à des distances variables selon les essences. Ensuite, des interactions complexes interviennent. La végétation forestière et l'humus constituent souvent une barrière physique qui empêche les graines d'atteindre le sol minéral et de germer. Lorsqu'ils parviennent à s'installer, les semis entrent en compétition avec la végétation concurrente, mais

aussi avec le peuplement en place, pour l'acquisition des ressources (eau, lumière et éléments minéraux). Enfin, la compétition exercée par le peuplement sur la végétation concurrente peut réduire la pression qu'elle exerce sur les semis.

Dans les situations problématiques, l'utilisation d'herbicides permet généralement de contrôler le développement de la végétation concurrente, pour un coût réduit. Cependant, la réglementation de plus en plus stricte (réduction de la liste des produits autorisés, plan Ecophyto) incite à limiter au maximum le recours aux produits phytosanitaires. Les méthodes mécanisées traditionnelles, dont le rôle est de faciliter l'installation des semis en les libérant de la végétation concurrente, ne sont souvent pas adaptées aux contextes de régénération naturelle, notamment sur les sites difficiles d'accès pouvant présenter une forte pente ou de nombreux obstacles. Afin de lever les situations de blocage de régénération naturelle, l'étude des interactions entre semis, végétation concurrente et peuplement, ainsi que le développement de méthodes alternatives de préparation de site sont indispensables.

Depuis 2009, des expérimentations sont menées par l'INRA de Nancy (équipe MGVF¹), en partenariat avec l'ONF (DT Alsace), dans le cadre du projet WE-PP (Wintzenheim-Eguisheim-Petite Pierre). Ce projet a été initié suite à la demande de l'ONF d'expérimenter de nouvelles méthodes permettant de lever les blocages de régénération naturelle par les éricacées et les graminées, situations fréquemment rencontrées dans les peuplements de moyenne montagne. Il cherche notamment à analyser les effets combinés du degré d'ouverture du couvert adulte et de la préparation du sol sur la régénération naturelle (Dassot et Collet, 2015 ; Dassot *et al.*, 2015). Ce projet fait intervenir des méthodes mécanisées innovantes, basées sur l'utilisation d'outils spécifiques montés sur mini-pelle, visant à éliminer la végétation concurrente et à travailler le sol afin de réussir la régénération naturelle dans les situations fortement contraignantes, voire de blocage total.

¹ À compter de février 2017, l'équipe MGVF (Mission Gestion de la Végétation en Forêt) devient le pôle RENFOR (RENovellement FOrestier) INRA-ONF-AgroParisTech

Plus particulièrement, le propos est ici d'évaluer l'impact de différentes méthodes de préparation du sol sur l'installation et la croissance en hauteur des semis le long d'un gradient d'ouverture du couvert.

Le réseau WE-PP : deux sites expérimentaux en Alsace

Le réseau WE-PP a été installé en 2009 sur deux sites expérimentaux, situés sur le versant alsacien des Vosges, où le blocage de la régénération est effectif depuis plusieurs décennies. Les deux sites, particulièrement difficiles d'accès (forte pente et présence de nombreux obstacles) ont des historiques sylvicoles, des peuplements forestiers et des communautés végétales très différents :

- Le site de la Petite Pierre (PP) est un peuplement régulier de hêtre situé en forêt domaniale de la Petite Pierre (altitude 387 m), dans le Bas-Rhin. Le sol est acide (pH 4) et de type sablo-limoneux sur grès. La hauteur moyenne de ce peuplement est d'environ 20 m et la végétation au sol est majoritairement composée de myrtille (*Vaccinium myrtillus*, figure 1 haut).
- Le site de Wintzenheim-Eguisheim (WE) est un peuplement mélangé de hêtre et de sapin pectiné situé en forêts communales de Wintzenheim et d'Eguisheim (altitude 751 m), dans le Haut-Rhin. Le sol est acide (pH 4) et de type sablo-limoneux sur granite. La hauteur moyenne du peuplement est d'environ 27 m et la végétation au sol est majoritairement composée de fétuque géante (*Festuca gigantea*, figure 1 bas).

Dispositif expérimental

En 2009, des placettes de 25 m x 25 m ont été installées sur chaque site (10 sur le site PP et 12 sur le site WE). Le couvert forestier a été maintenu en place pour la moitié des placettes et coupé à blanc pour l'autre moitié afin d'obtenir 5 placettes « sous couvert » et 5 placettes « en trouée » sur le site PP, et respectivement 6 et 6 sur le site WE. Chaque placette a ensuite été divisée en cinq bandes parallèles de 5 m de largeur, chaque bande correspondant à une modalité différente de préparation du sol (figure 2 et encadré) : TE = témoin sans préparation ; HE = élimination de la végétation par herbicide ; PH = griffage à la pioche herse® ; SR = bêchage au scarificateur réversible® ; CV = semis d'une couverture végétale peu compétitive après griffage.

Des placeaux de 1 m² ont été définis le long de chaque bande à raison de 10 ou 11 par bande, soit un total d'environ 1200 placeaux sur l'ensemble des deux sites. Des photos hémisphériques

ont été prises au-dessus de chaque placeau afin de calculer l'éclairement relatif ER (pourcentage d'éclairement par rapport à l'éclairement en plein découvert). Cet éclairement relatif peut être considéré comme un moyen d'évaluer l'ouverture du couvert mais également la proximité des semenciers.

L'installation du dispositif a été suivie d'une forte fructification des arbres semenciers, de sorte que les conditions d'ensemencement initial ont été aussi bonnes que possible. De 2010 à 2013, une fois par an, le recouvrement de la végétation concurrente (toutes espèces herbacées confondues, en % de la surface au sol) et la densité de semis, toutes essences forestières confondues, ont été évalués dans chaque placeau. En 2014, les dégâts importants de hannetons ont ruiné le site de la Petite Pierre, qui a dû être abandonné. En 2015, des mesures de hauteur des semis sont venues s'ajouter aux mesures de densité sur le site WE (nombre et hauteur des semis dépassant 50 cm).



Fig. 1 : végétation concurrente sur le site PP (myrtille, en haut) et le site WE (fétuque, en bas)

Les méthodes mécaniques testées contrôlent efficacement la végétation

De 2010 à 2013, la végétation concurrente recolonise progressivement le sol préparé. La recolonisation est par ailleurs beaucoup plus rapide sur le site WE (fétuque) que sur le site PP (myrtille). Pour chaque année étudiée, la végétation est d'autant plus abondante que l'éclaircissement (ouverture du couvert) est important (figure 3 page suivante).

Malgré les différences de communautés végétales et de dynamique de recolonisation, les méthodes de préparation du sol présentent des résultats similaires sur les deux sites.

La modalité TE présente systématiquement les recouvrements de végétation les plus importants (plus de 90 % à PP, quel que soit le niveau d'éclaircissement, et de 60 % à 90 % à WE lorsque l'éclaircissement augmente). Les méthodes mécaniques PH et SR, très proches, permettent de réduire la quantité de végétation concurrente durant trois années après préparation du sol sur le site PP et deux années sur le site WE. La modalité CV, qui met en jeu des espèces herbacées moins envahissantes, est encore plus efficace et présente systématiquement les recouvrements les plus faibles lorsque l'éclaircissement est important. La modalité HE, qui permet d'obtenir les recouvrements les plus faibles lorsque le couvert est fermé, présente dès la deuxième année des recouvrements supérieurs aux méthodes alternatives lorsque l'éclaircissement augmente.

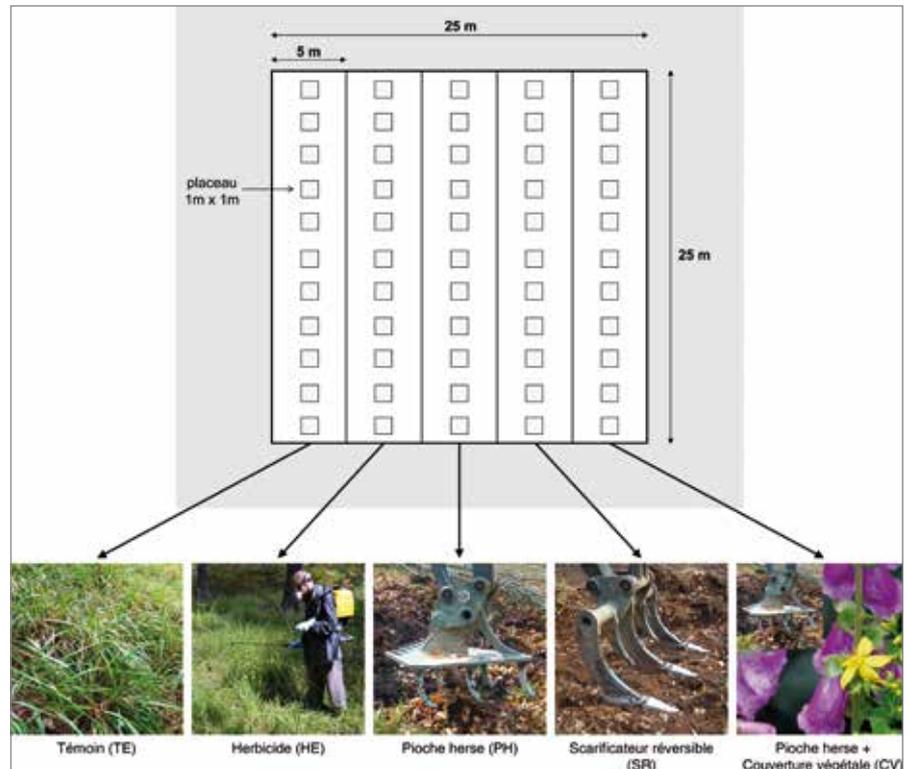


Fig. 2 : organisation des placettes expérimentales et modalités de préparation du sol mises en œuvre dans chaque placette, sur les deux sites. Les placettes sont installées sous couvert pour une moitié et en trouée pour l'autre.

Modalités de préparation du sol

Cinq modalités ont été mises en œuvre dans chacune des placettes des sites PP et WE. Elles incluent deux modalités de référence :

- **Témoine (TE)** : aucune intervention, maintien de la végétation spontanée.
- **Herbicide (HE)** : élimination de la végétation au sol par pulvérisation de glyphosate (pulvérisateur à dos, 2160 g/ha).

Trois modalités de préparation mécanique du sol sont également expérimentées. Elles mettent en jeu des outils mécaniques innovants qui permettent à la fois de retirer la végétation concurrente (retrait de la compétition) et de travailler le sol à des profondeurs variables (meilleur accès aux ressources). Ces outils sont montés sur une mini-pelle, dont la maniabilité permet d'effectuer le travail du sol de manière localisée, sur des sites difficiles d'accès :

- **Pioche Herse® (PH)** : utilisation de l'outil PH (fabricant : Kirpy, 47390 Layrac, France) monté sur mini-pelle pour griffer le sol jusqu'à 25 cm de profondeur, arracher la végétation et décaper l'humus.
- **Scarificateur Réversible® (SR)** : utilisation de l'outil SR (fabricant : Kirpy, 47390 Layrac, France) monté sur mini-pelle pour bêcher le sol jusqu'à 40 cm de profondeur, extraire la végétation et décompacter le sol sans retourner les horizons pédologiques.
- **Couverture végétale (CV)** : préparation du sol à la Pioche Herse® et semis de plantes sélectionnées pour leur moindre compétitivité vis-à-vis de la régénération (densité de semis : 1 g/m²). Cette technique permet de ralentir la réinstallation de la végétation spontanée, très compétitrice. Mélange de plantes utilisé : alliaire officinale, digitale pourpre, aspérule odorante, millepertuis commun, myosotis des bois, séneçon de Fuchs, silène penché, stellaire holostée.

Les méthodes mécaniques testées favorisent l'installation de la régénération

Les résultats obtenus en termes d'acquisition de la régénération sont similaires sur les deux sites, bien que la gamme de densité de semis soit différente (figure 4). La régénération naturelle des deux sites est bloquée depuis plusieurs décennies. Il n'est donc pas étonnant de n'observer presque aucune installation de semis dans la modalité témoin, sur toute la gamme d'éclairement. Malgré un bon contrôle de la végétation concurrente, la modalité HE ne permet l'installation que d'un nombre très réduit de semis sous un couvert forestier important (environ cinq semis au mètre carré, sur les deux sites), et d'aucun semis lorsque l'éclairement augmente, la matière

végétale morte empêchant l'accès des graines au sol minéral.

Les méthodes mécaniques alternatives PH, SR et CV, quant à elles, rendent possible l'installation de la régénération. La suppression de la barrière physique que représente la végétation vivante ou morte et l'exposition du sol minéral permettent aux semis de s'installer et à la régénération de devenir conséquente sous couvert, où les semenciers maintenus en place fournissent de nombreuses graines. Malgré une diminution importante de la densité de la régénération lorsque l'éclairement (et donc, l'éloignement des semenciers) augmente, les modalités PH, SR et CV permettent encore l'installation de quelques semis dans les trouées. La hiérarchie entre les différentes méthodes de préparation du sol est

la même sur les deux sites (par ordre de performance croissante) : TE, HE, PH, SR et CV.

Les méthodes mécaniques testées favorisent la croissance en hauteur de la régénération

Seul le site WE est concerné par les mesures de hauteur, réalisées en 2015. Six années après préparation du sol, la densité de semis de plus de 50 cm de hauteur, toutes essences confondues (figure 5a), est bien inférieure à la densité totale et montre une tendance opposée. Le nombre de semis de plus de 50 cm augmente ainsi avec l'éclairement, excepté pour TE qui reste à 0. La modalité HE, qui ne présente pas de semis par faible éclairement, n'en compte qu'un nombre extrêmement réduit lorsque

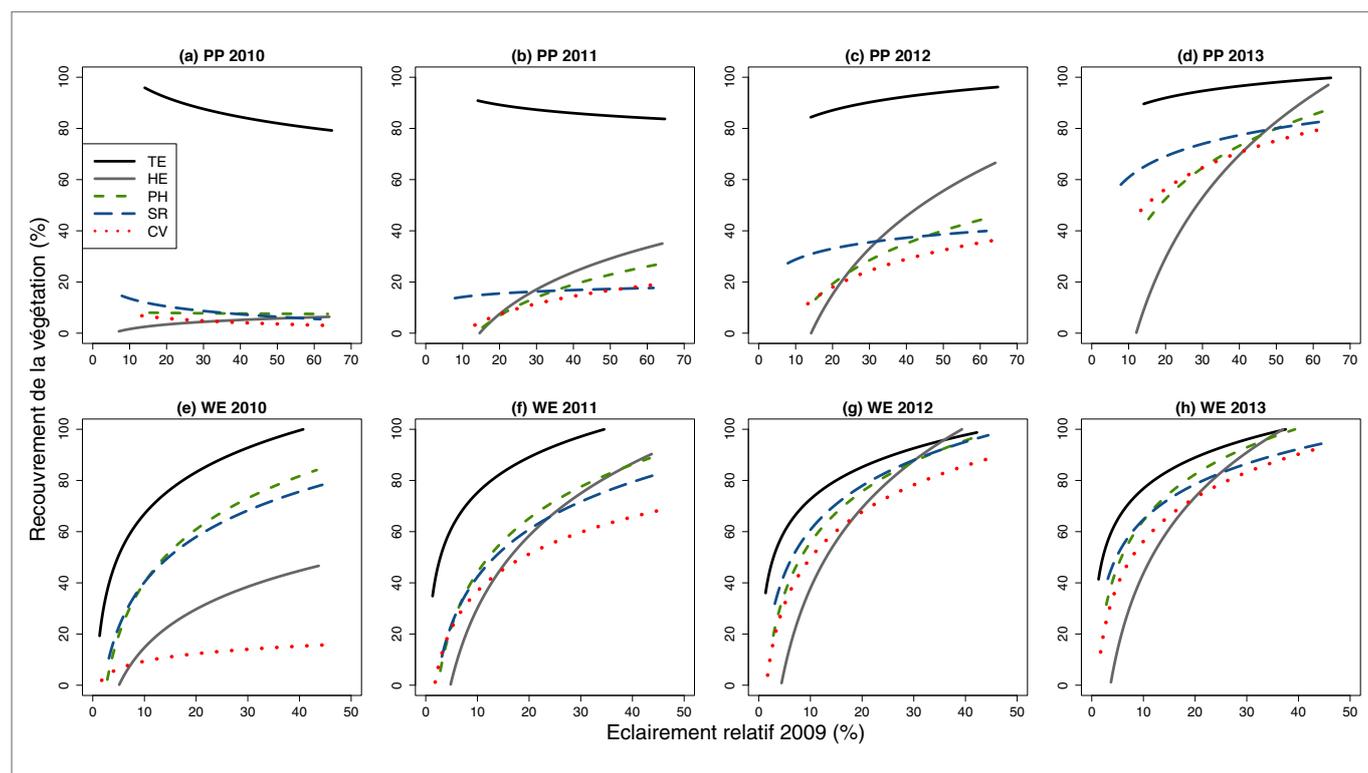


Fig. 3 : recouvrement total de la végétation en fonction de l'éclairement initial (mesuré en 2009) sur les sites PP (en haut) et WE (en bas) pour les quatre premières années de l'expérimentation

l'éclaircissement augmente (moins de 1 par m², en moyenne). Les méthodes mécaniques alternatives PH, CV et SR ne permettent pas d'obtenir des semis de plus de 50 cm par faible éclaircissement (moins de 1 par m²), mais présentent en revanche 2, 3 et 4 semis de plus de 50 cm au mètre carré par fort éclaircissement, respectivement.

Ces résultats se confirment lorsqu'on analyse séparément les semis de hêtre et les semis de saule (*Salix caprea*), seules essences présentant des semis de plus de 50 cm. Pour le hêtre (figure 5 b), le nombre de semis de plus de 50 cm est nul pour les modalités TE et HE, sur toute la gamme d'éclaircissement. Pour les techniques de préparation mécanique du sol, la densité de semis de plus de 50 cm reste inférieure à 0,5

semis au mètre carré sous couvert, et inférieure à 1 en trouée. Les semis de saule (figure 5c) ne parviennent pas à s'installer sous couvert, quelle que soit la modalité. Les traitements TE et HE ne permettent pas l'installation du moindre semis, sur toute la gamme d'éclaircissement. Les modalités PH et CV permettent d'obtenir environ 1 semis de plus de 50 cm pour les éclaircissements les plus importants, tandis que la modalité SR permet d'obtenir environ 3 semis.

La relation entre hauteur des semis et éclaircissement (figure 6) est essentiellement influencée par le saule, dont la croissance est particulièrement rapide. La hauteur augmente ainsi avec l'ouverture du couvert, et se situe dans une gamme allant de 50

à 100 cm sous couvert et de 50 à 650 cm en trouée. Le faible nombre de semis dépassant 50 cm dans les modalités TE et HE ne permet pas d'évaluer la significativité de leurs différences avec les modalités PH, SR et CV. Les modalités PH et SR, très proches, présentent les croissances en hauteur les plus importantes, loin devant la modalité CV, qui se montrait pourtant particulièrement efficace en terme de densité de semis.

Ces résultats semblent indiquer que l'utilisation de plantes de couverture moins concurrentielles serait un frein à la croissance en hauteur de la régénération naturelle et rendent discutable l'investissement (coût d'achat et temps de mise en œuvre) dans ce type de préparation de site.

Fig. 4 : densité de semis au mètre carré en fonction de l'éclaircissement initial (mesuré en 2009), quatre années après préparation du sol, pour le site PP (a) et six années après préparation du sol pour le site WE (b)
Les surfaces colorées représentent l'erreur standard des prédicteurs

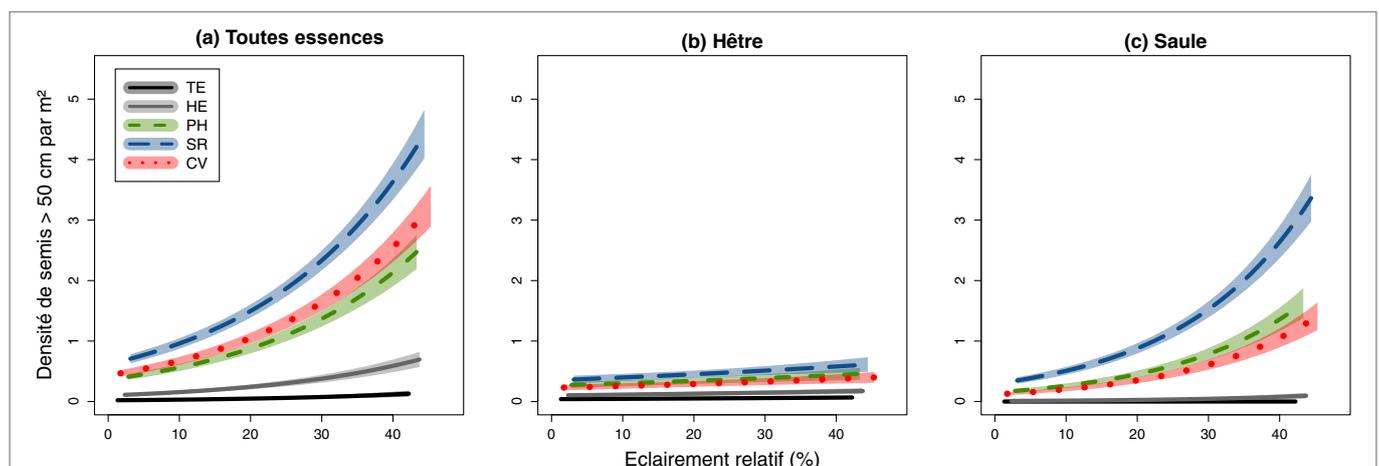
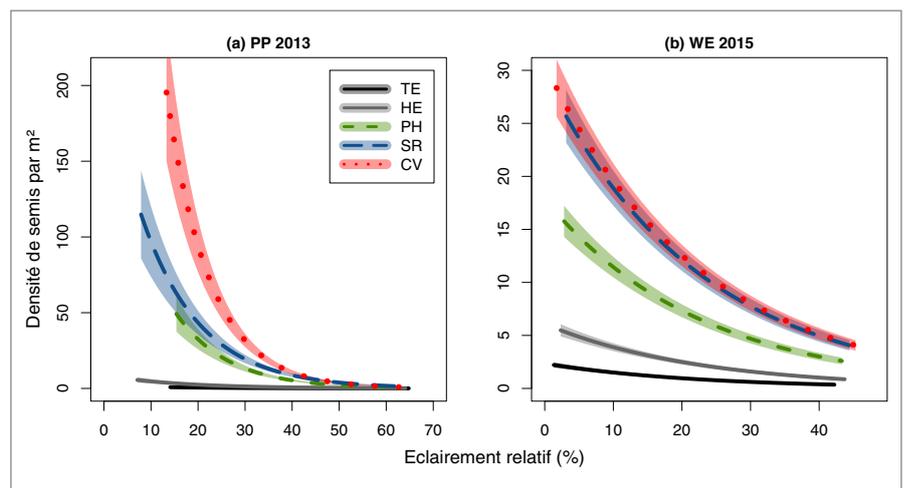


Fig. 5 : densité de semis de plus de 50 cm de hauteur au mètre carré en fonction de l'éclaircissement initial (mesuré en 2009) pour le site WE, six années après préparation du sol
Sont présentés les résultats globaux (a), ceux du hêtre (b) et ceux du saule (c). Les surfaces colorées représentent l'erreur standard des prédicteurs.

Conclusion

Cette étude a permis de montrer que le griffage et le bêchage mécanique du sol sous couvert étaient nécessaires pour assurer l'installation d'une régénération dense dans les peuplements de moyenne montagne dominés par la myrtille et la fétuque. La suppression de la compétition herbacée et la mise à nu du sol minéral permettent aux graines de germer en quantité (à condition que la préparation du sol soit suivie d'une fructification), contrairement à l'utilisation d'herbicide, qui laisse une épaisse couche de matière végétale morte. Par la suite, une ouverture modérée du couvert permet à la régénération de se développer en hauteur.

La couverture végétale, pourtant favorable à l'installation des semis, semble toutefois limiter leur croissance en hauteur. Elle ne présente donc qu'un intérêt limité compte tenu du coût d'achat et de mise en œuvre.

Ces résultats sont essentiellement influencés par la dynamique des essences pionnières de lumière, notamment le saule. Le suivi de l'expérimentation sur une période plus longue permettra d'établir des conclusions pour les essences d'ombre et les essences cibles (hêtre et sapin), à croissance juvénile plus lente.

Les méthodes mécaniques alternatives mises en œuvre dans cette étude peuvent être utilisées dans

toutes les régénérations naturelles où la végétation au sol est essentiellement composée d'éricacées ou de graminées (excepté la molinie). L'utilisation d'une mini-pelle offre par ailleurs de nombreux avantages. Elle permet de travailler le sol sur des sites difficiles d'accès, présentant une forte pente (jusqu'à 60 %) ou de nombreux obstacles (rochers). Son poids réduit (de 2,5 à 6 tonnes), ses chenilles en caoutchouc et sa capacité à réaliser un travail localisé permettent de limiter l'impact environnemental lors du renouvellement de la forêt. Une évaluation technico-économique est en cours afin d'évaluer le rapport coût-bénéfice de l'utilisation d'outils montés sur mini-pelle, sachant qu'actuellement les coûts d'utilisation de la Pioche-Herse® et du Scarificateur Réversible® sont respectivement estimés à 0,5 € et 1,05 € par mètre linéaire pour un travail en bande de 1,5 m de large.

Mathieu DASSOT

EcoSustain, Bureau d'études
en environnement, R&D
31 rue de Volmerange,
57 330 Kanfen
contact@ecosustain.fr

Alexandre FRAUENFELDER

Léon WEHRLÉN

Catherine COLLET

UMR LERFoB, AgroParisTech, INRA
54 000 Nancy
prenom.nom@inra.fr

Remerciements

Les auteurs remercient Erwin Thirion et Florian Vast pour l'installation et le suivi des sites expérimentaux, ainsi que Vanessa Vilard, Fabien Duez et Xavier Auzuret pour leur participation au travail de terrain. Ils remercient également les agents locaux des agences ONF de Colmar et de Saverne, ainsi que les communes de Wintzenheim et Eguisheim pour la mise à disposition gracieuse du site. Le projet a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF, programmes E 30/07, E 16/2011 et E/21/2013) ainsi que de l'Office National des Forêts (ONF, programmes « Maîtrise de la végétation forestière concurrente 2007-2010 et 2011-2014 »).

Références

Dassot M., Collet C., 2015. Manipulating seed availability, plant competition and litter accumulation by site preparation and canopy opening to ensure regeneration success in temperate low-mountain forest stands. *European Journal of Forest Research* 134, pp. 247-259

Dassot M., Wehrén L. et Collet C., 2015. La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent l'installation de la régénération naturelle. *Forêt Entreprise* 223, pp. 17-21

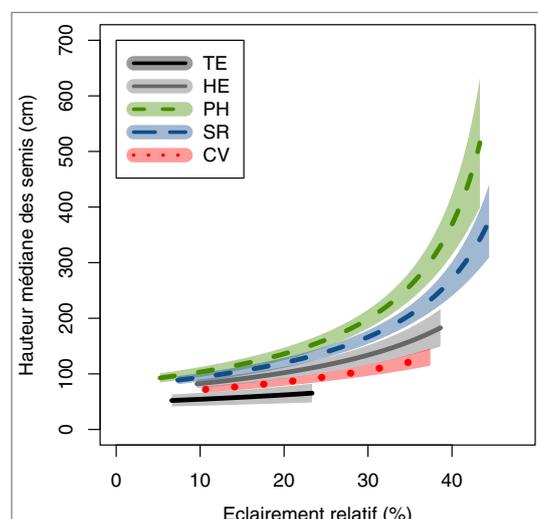


Fig. 6 : relation entre hauteur des semis de plus de 50 cm et éclairage initial (mesuré en 2009)

La relation est majoritairement influencée par le saule. Les surfaces colorées représentent l'erreur standard des prédictes.

Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers

Face aux enjeux du climat, les politiques publiques cherchent à réduire les émissions de gaz à effet de serre en s'appuyant sur les énergies et matériaux renouvelables, dont le bois. Ce qui ravive les questionnements de gestion forestière durable, en particulier en ce qui concerne l'effet d'exportations accrues sur la vitalité des sols, et par conséquent sur l'ensemble de l'écosystème forestier. Pour explorer la question en contexte tempéré, l'INRA met en place un réseau expérimental doublement original : dans le choix du dispositif expérimental et dans la méthode d'installation, tout à fait inédite.

Les pouvoirs publics français et européens ont fixé un objectif de 23 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale métropolitaine pour 2020 (Grenelle de l'Environnement et Directive européenne 2009/28/CE). Cet objectif est maintenant actualisé à 32 % à l'horizon 2030. Au bilan de l'année 2015, la France en était à 14,9 % d'énergies renouvelables, un peu en retard sur la trajectoire définie par la Directive (MEEM, 2017). Pour atteindre l'objectif, la filière bois-énergie est particulièrement mise à contribution. Pour exemple, les volumes de bois commercialisés en bois-énergie (hors auto-consommation), qui s'élevaient à 405 000 m³ en 2008, ont augmenté de 147 % en Lorraine entre 2008 et 2012 (source : DRAAF, enquête annuelle de branches 2012).

Cet objectif ambitieux amène à envisager des « gisements » supplémentaires selon deux types de stratégies : (i) le développement de cultures dédiées de types TCR et TTCR¹ ; (ii) une mobilisation accrue de biomasse forestière par raccourcissement des rotations, par l'exploitation d'arbres

entiers, houppier inclus, ou par la récolte des rémanents d'exploitation usuellement restitués à l'écosystème. L'éventualité d'une récolte plus intense des menus bois et résidus de coupe, compartiments réservoir de minéralomasse et de diversité biologique, interroge nécessairement sur les impacts que cela pourrait engendrer sur la pérennité de la fertilité, de la productivité et sur la diversité des organismes des sols forestiers. Une question s'impose alors : comment récolter durablement plus de bois-énergie sans remettre en cause la fertilité et la biodiversité des sols forestiers ?

Les problématiques d'intensification des récoltes, en relation avec la mécanisation forestière, ont suscité de par le monde de nombreuses études destinées à évaluer les impacts sur le long terme. Mais ces travaux concernent surtout les zones tropicale, boréale et sub-boréale. Le manque de références en contexte tempéré, notamment en peuplements feuillus de plaine, ne permet pas d'appréhender convenablement les effets d'une exportation accrue de biomasse sur la forêt française. Ce constat soulève la nécessité d'un

dispositif expérimental d'envergure, adapté au contexte biogéographique et sylvicole des forêts françaises mais aussi à la réactivité plus ou moins différée des écosystèmes aux exportations, selon les situations géographiques.

C'est ainsi que l'idée du réseau MOS – Matières Organiques du Sol – s'est imposée, pour se concrétiser en janvier 2013 avec les premières opérations d'installation. Ce dispositif expérimental multisite est piloté par l'unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers (BEF) de l'INRA Nancy-Lorraine en collaboration notamment avec l'ONF. Le but est d'évaluer les impacts à court, moyen et long termes d'un prélèvement intense de biomasse forestière sur l'écosystème forestier ainsi que d'éventuels moyens de remédiation.

Après un bref rappel de l'état des connaissances dans ce domaine, nous allons présenter les principes de la conception du réseau, puis son installation, avec les innovations mises en œuvre pour caractériser l'état initial des sites et faciliter les suivis, et nous évoquerons les projets de recherche dont il est le support.

¹ TCR (TTCR) = Taillis à (Très) Courte Révolution

Impacts des prélèvements accrus de biomasse sur les sols forestiers

Quelques résultats de l'Étranger

Il existe à travers le monde plusieurs réseaux de suivi à long terme des effets d'une intensification des récoltes sur les propriétés biogéochimiques et biologiques des sols forestiers : le réseau CIFOR (*Center for international forestry research*) mis en place en forêt tropicale en 1998 (Nambiar *et al.*, 1999), les dispositifs nord-américain LTSP (*long-term soil productivity*) installés en 1995 en zone boréale à tempérée (Powers *et al.*, 2005) et, depuis une quarantaine d'années, un ensemble de sites expérimentaux dans la zone boréale de Fennoscandie (Helmisaari *et al.*, 2011).

Les impacts d'une telle intensification des prélèvements ont fait l'objet d'une analyse bibliographique, diligentée par l'Ademe via le GIP Ecofor, sur la base de nombreuses publications souvent en contexte tropical ou boréal/sub-boréal (Achat *et al.*, 2015). Les réponses des écosystèmes apparaissent très contrastées selon la zone biogéographique de l'étude :

- en **forêt tropicale**, les effets d'un prélèvement accru de biomasse (récolte des grumes + résidus d'exploitation+ litières) sont rapidement détectables : diminution très rapide de la biomasse microbienne (Mendham *et al.*, 2002) et diminution progressive des taux de minéralisation du carbone et d'azote (O'Connell, 2004), baisse de production en volume en moins de 7 années après exploitation (Laclau *et al.*, 2010 ; Nzila *et al.*, 2002) ;
- en **zone boréale et sub-boréale**, les impacts peuvent être plus lents à apparaître : diminution des taux de minéralisation du carbone et d'azote 10 à 30 ans après une exploitation par arbre entier (Smolander *et al.*, 2010 ; Powers *et al.*, 2005), diminution des stocks de carbone et d'éléments nutritifs (N, P, Mg, Ca, K) 15 à 25 après (Thiffault *et al.*, 2011 ; Tamminen *et al.*, 2012). Sur les peuplements résineux boréaux,

les pertes de production en surface terrière et en volume se généralement font ressentir 10 ans après la récolte d'arbres entiers (Hemilsaari *et al.*, 2011).

Agents essentiels de la dégradation, du recyclage des matières organiques et donc de la fertilité, la faune et les communautés microbiennes (champignons et bactéries) du sol peuvent aussi subir les conséquences d'une récolte accrue de biomasse forestière, avec des effets tout autant contrastés. Si certaines études sous climat boréal ne montrent aucun impact négatif des prélèvements de menus-bois sur la diversité biologique du sol, d'autres indiquent clairement, en zone boréale et sub-boréale, une modification de la composition des communautés microbiennes (Hartmann *et al.*, 2012) ou une diminution de la densité de mycorhizes et de la richesse en champignons mycorrhiziens trente ans après la récolte des houppiers (Mahmood *et al.*, 1999). Ces pratiques perturbent également certains macro-arthropodes décomposeurs des litières (collemboles, araignées, insectes, acariens) qui voient leur abondance chuter dès cinq ans après la récolte. Un suivi mené sur pineraies en Suède a illustré que leurs populations demeuraient modifiées jusqu'à quinze ans après l'exportation (Bengtsson *et al.*, 1997).

En France, le guide « rémanents » de l'ADEME et le rapport « Resobio »

Sur la base de diagnostics à dire d'experts, l'ADEME a publié un guide pratique pour « *La récolte raisonnée des rémanents en forêt* » (Cacot *et al.*, 2006). Il fournit une typologie de la sensibilité des sols à l'exportation des rémanents, fondée sur des critères faciles à mettre en œuvre sur le terrain : texture des sols, type d'humus, groupes floristiques. Selon le niveau de fertilité et de sensibilité des sols, ce guide « rémanents » propose des recommandations de gestion et des scénarios intégrant ou non la récolte

des rémanents ainsi que différents niveaux possibles de compensation par amendement. Nécessairement restrictif et incomplet, ce premier guide doit être révisé et enrichi grâce à l'actualisation des connaissances (rapport « Resobio » ; Landmann et Nivet (coord.), 2014), afin d'affiner le diagnostic de sensibilité, qui jusqu'ici repose pour l'essentiel sur la texture du sol et la géologie. Il s'agit notamment de prendre en compte la dimension biologique de la fertilité des sols et d'introduire des préconisations de préservation de la biodiversité inféodée au bois mort. Mais l'exercice reste délicat dans nos contextes tempérés et le réseau MOS doit permettre à l'avenir d'avancer sur des bases plus solides.

Le réseau MOS : principes de constitution d'un dispositif original

Le réseau expérimental Matière Organique des Sols est conçu pour suivre les impacts d'une modification de la quantité de matière organique sur les sols et les peuplements forestiers sur une durée minimale de 30 ans. La dégradation des chutes annuelles de litière et du bois au sol alimente les réseaux trophiques sur lesquels repose l'équilibre des écosystèmes forestiers. Ce recyclage des matières organiques par la faune du sol et ses communautés microbiennes (champignons décomposeurs et bactéries) assure une part essentielle de la fertilité et revêt une fonction d'autant plus importante que le sol est pauvre. L'exportation de la biomasse issue des résidus d'exploitation représenterait une rupture brutale des cycles biogéochimiques. Un tel dispositif expérimental, étudiant les effets d'une perturbation majeure de l'écosystème, apparaît complémentaire de sites d'observation comme les sites du réseau SOERE (sites ateliers et réseau RENECOFOR), qui suivent les évolutions naturelles sur le long terme du contexte forestier général.

Un dispositif pluridisciplinaire

Le réseau a été conçu de façon pluridisciplinaire pour étudier le fonctionnement des écosystèmes forestiers à diverses échelles, de celle des microorganismes jusqu'à celle du peuplement. Constitué de 18 sites expérimentaux répartis sur une large moitié nord du territoire métropolitain (figure 1), il doit servir de support à la compréhension des écosystèmes forestiers, en ciblant en particulier :

- les effets des prélèvements de biomasse sur les propriétés du sol et des flux biogéochimiques ;
- les effets des prélèvements de biomasse sur les communautés du sol et du bois mort : macrofaune, mésofaune et microfaune (bactéries et champignons) ;
- les effets d'une compensation des exportations par retour en forêt des cendres de chaufferie-bois ;
- les effets des prélèvements de biomasse sur la croissance et la productivité des peuplements à moyen ou long terme.



Fig. 1 : carte des sites expérimentaux du réseau MOS

Site	Essence	Propriété	Age (en 2017)	Altitude	Précipitations annuelles moyennes (mm/an)	pHeau (0-5cm)	Humus
Champenoux (54)	chêne	domaniale	40 ans	280	780,9	5,1	eumull/mesomull
Compiègne (60)	chêne	domaniale	25-30 ans	180	734,5	5,2	mesomull
Fontainebleau (77)	chêne	domaniale	25-50 ans	135	697,8	4,4	moder
Prieuré Grosbois (03)	chêne	domaniale	40 ans	319	795,4	4,6	dysmull
Reichshoffen (67)	chêne	communale	40 ans	270	844,5	4,8	mesomull/dysmull
Tronçais (03)	chêne	domaniale	50 ans	270	797	5,1	mesomull/dysmull
Ban d'Harol (88)	hêtre	domaniale	30-35 ans	185	1092,3	4,7	mesomull
Compiègne (60)	hêtre	domaniale	40 ans	180	749,4	4,8	mesomull
Darney (88)	hêtre	domaniale	30-40 ans	500	1128,4	4,5	mesomull/oligomull
Gaillefontaine (76)	hêtre	privée	40 ans	265	912,9	4,1	eumull/mesomull
St Quirin (57)	hêtre	domaniale	30-35 ans	400	1083,8		dysmull
Verrière du Grosbois (25)	hêtre	domaniale	50-60 ans	585	1243,5	4,4	mesomull/oligomull
Bouillancourt (80)	douglas	privée	25 ans	147	687,0	3,8	mesomull
Duesme (21)	douglas	domaniale	30 ans	320	789,0	-	dysmull
Sedan (08)	douglas	domaniale	30 ans	155	899,0	-	-
Chissey en Morvan (71)	douglas	privée	27 ans	600	825,0	-	mesomull
Propières (69)	douglas	privée	26 ans	950	878,0	-	mesomull
Urmatt (67)	douglas	privée	17 ans	700	845,0	-	mesomull

Tab. 1 : caractéristiques principales des 18 sites MOS

Par ces différentes approches, en testant des prélèvements d'intensité croissante, il vise à déterminer le niveau de résistance et de résilience des écosystèmes forestiers et identifier, s'il existe, un seuil de non-retour à l'équilibre des flux et / ou des seuils de richesses microbiennes (ou identification d'espèces clé de voûte) à partir desquels la restauration de l'équilibre n'est plus possible (point de basculement).

Il a vocation à suivre les réponses de l'écosystème forestier sur un pas de temps minimum de vingt à trente ans.

Sélection des sites

Le premier critère est de travailler sur des **peuplements de plaine et de collines** représentatifs de la forêt française et susceptibles de faire l'objet d'un prélèvement plus intense de biomasse forestière. Nous avons d'emblée exclu les massifs d'altitude : du fait de leur difficulté d'accessibilité et d'exploitabilité, ils ne représentent pas un gisement prioritaire de biomasse pour la filière bois-énergie. Trois essences d'intérêt économique de la forêt française seront étudiées : le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) et le Douglas (*Pseudotsuga menziensis* Mirb.). Ces essences constituent une part importante de la production de bois d'œuvre et de construction en France.

Le réseau est construit de façon à couvrir un large spectre de conditions pédoclimatiques et prend en compte divers niveaux de fertilité de sol (cf. tableau 1), en veillant à ce que chaque site corresponde à une station *a priori* homogène et en excluant les situations très contraignantes comme la présence d'engorgement, de forte pente ou de sols superficiels. De même, les sites ont été choisis dans l'aire actuelle de production des essences étudiées, tout en considérant les aires climatiques futures modélisées pour 2100 (Badeau et al., 2004). Ainsi, pour le hêtre, deux sites (Compiègne et Gaillefontaine) ont été choisis en région Grand-Ouest, où sa présence est remise

en question pour l'horizon 2100 en raison des conditions hydriques qui deviendraient de plus en plus défavorables (Rendez-vous techniques ONF, hors-série 2007). Ces deux sites feront office de « sentinelles » face aux effets cumulés des exportations intensifiées de biomasse et des éventuelles modifications climatiques.

La phase de prospection s'est déroulée entre octobre 2012 et juin 2013 pour le choix des sites chêne et hêtre, et s'est étendue jusqu'au printemps 2016 pour les sites Douglas. Elle a consisté, pour chaque essence, à visiter 10 à 15 parcelles réparties sur des massifs différents pour en retenir six. Sur les 18 sites du réseau, onze sites feuillus et deux sites Douglas sont en forêt domaniale ou communale (cf. tableau 1). Une convention cadrant les travaux effectués et la gestion de chaque site a été signée entre l'INRA, représenté par l'unité BEF porteuse du projet, et le propriétaire de la forêt, qu'elle soit publique ou privée.

Pour les sites feuillus, les opérations de caractérisation initiale du sol et du peuplement ont été réalisées au cours du printemps 2013 ; pour les sites Douglas, elles ont commencé courant 2016 et se poursuivront au premier semestre 2017.

Critères sylvicoles et modalités testées

Pour des raisons pratiques, il a été décidé de se focaliser sur des **peuplements purs** issus de plantation ou de régénération naturelle. Le mélange d'essences compliquerait très sérieusement les opérations de suivi à long terme et l'évaluation des exportations minérales (la composition chimique du bois et des litières varie selon les essences). De plus, le fonctionnement biogéochimique des sols (minéralisation de l'azote, du carbone, flux d'éléments nutritifs) ainsi que la composition spécifique des communautés d'organismes (en particulier des champignons) diffèrent sous peuplements mélangés.

Et enfin, on a fait le **choix original** de se placer au **maximum de l'accroissement courant annuel** ($m^3/ha/an$), alors que les réseaux existants sur l'étude des exportations de biomasse sont pour la plupart calés sur la coupe finale. Cette phase du développement est cruciale pour l'étude des cycles biogéochimiques car c'est à ce stade que les prélèvements en éléments nutritifs dans le sol sont les plus importants. L'essentiel des besoins de l'arbre est couvert par ce qui provient du sol alors que la part des translocations internes



Anthina flammea, champignon spécifique de la litière de Hêtre

M. Buée, INRA

y est encore peu importante. En outre, la période d'accroissement maximal coïncide avec l'âge de la première éclaircie, susceptible d'être mécanisée et commercialisée en bois-énergie, houppier compris. Elle se situe entre 20 et 30 ans pour le Douglas, et entre 30 et 60 ans pour les feuillus selon les régions et les classes de fertilité.

Quatre modalités de traitement des rémanents sont étudiées, qui présentent un niveau croissant d'exportations de biomasse.

- **Témoin** : le peuplement est éclairci selon la sylviculture menée actuellement, en laissant sur place les rémanents après exploitation.
- **Sans rémanents** : lors de chaque éclaircie, tous les menus-bois et le houppier sont exportés en même temps que la grume.
- **Compensation** : l'arbre entier est récolté (houppier et grume) mais l'exportation de biomasse et certains nutriments (Ca, Mg, P) est compensée par un apport de cendres issues de chaufferie-bois. Leur composition est préalablement déterminée en laboratoire.
- **Sol nu** : l'arbre entier est exploité lors de l'éclaircie et la litière est récoltée chaque année après la chute des feuilles. Cette modalité, qui n'a aucune réalité sylvicole actuelle, permettra d'observer des réactions extrêmes de l'écosystème (accélération de l'apparition d'un potentiel point de basculement).

Chaque site expérimental dispose d'une **surface minimale de 2 ha**, sur laquelle les traitements sont répétés trois fois. Un traitement est établi sur un plateau de **40 m par 40 m** ; cela correspond à la surface minimale avec un nombre d'arbres suffisant pour rester représentatif d'un peuplement, une condition essentielle pour suivre la productivité sur la durée de l'expérimentation.

Caractérisation initiale fine des sites expérimentaux MOS

Pour pouvoir faire un suivi pertinent sur plus de vingt ans, il est indispensable de décrire le plus finement possible l'état initial de chaque site expérimental avant l'installation des dispositifs, de façon à prendre en compte l'hétérogénéité initiale dans l'implantation des différentes modalités et limiter les biais ultérieurs. Cependant, si la description des peuplements est relativement aisée selon les méthodes d'inventaire classiques, caractériser finement la variabilité du sol sur 2 ha présente des difficultés : l'effort d'échantillonnage considérable que cela suppose s'accompagne ensuite, pour les analyses chimiques traditionnelles, d'un coût élevé et de délais fâcheux. Nous avons donc cherché un outil de substitution rapide, efficace et peu coûteux capable de décrire les propriétés des sols ; nous avons utilisé la spectrométrie proche et moyen infrarouge (NIRS/MIRS) et nous avons pu mettre au point une méthode particulièrement efficace.

Échantillonnage : prélèvements de sol et inventaires dendrométriques

Sur le terrain, il s'agit d'abord de quadriller la zone d'étude d'environ 2 ha selon un maillage de 20 m par 20 m relevé par GPS (Trimble Geo5T). Tous les 20 m, le point de prélèvement est matérialisé par un jalon et identifié selon sa position sur le maillage systématique par un couple lettre/numéro (numérotation des lignes et colonnes). La litière y est collectée sur un carré de 50 cm de côté. Sur ce même carré, on prélève trois carottes de sol qu'on segmente en 3 tranches de profondeur : 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm. Ces carottes sont ensuite assemblées en un seul échantillon homogénéisé par point et par profondeur, puis conditionnées pour des analyses ultérieures en laboratoire.

Selon la configuration de la parcelle, 70 points par site en moyenne ont été échantillonnés. La plupart du temps, les prélèvements ont été faits sur une surface légèrement supérieure aux 2 ha requis afin d'avoir une marge de manœuvre en cas d'aléas du terrain. À raison de 4 niveaux de prélèvement (litière + 3 profondeurs de sol), nous avons collecté en moyenne 277 échantillons par site, soit un total de 3320 échantillons pour les 12 sites feuillus. Après chaque campagne de terrain, les échantillons de sol ont été préparés pour les analyses spectrométriques et chimiques (tamisage, séchage, broyage).

Deux fosses pédologiques ont aussi été creusées à la périphérie de chaque dispositif pour une description des sols sur profil complet (description des horizons sur 1 m de profondeur). Ainsi, la collecte du sol et l'étude des profils renseignent un nombre conséquent de paramètres physico-chimiques des sols.

Pour les inventaires dendrométriques, les relevés ont été faits tous les 40 m sur 2 placettes circulaires concentriques (n = 12) :

- placette de 3 m de rayon : toutes les tiges sont mesurées ;
- placette de 5 m de rayon : sur la couronne entre 3 et 5 m de rayon, seules les tiges dont la circonférence est supérieure à 20 cm sont mesurées. On mesure aussi la hauteur des 3 plus gros arbres inventoriés sur l'ensemble de la placette.

Ces données ont permis de caractériser les peuplements sur l'ensemble de chaque dispositif à partir de calculs dendrométriques basiques : diamètre moyen, surface terrière, nombre de tiges à l'hectare et hauteur dominante.

Cartographier la variabilité des sols grâce à la spectrométrie infra-rouge, sans les analyses classiques

La méthode repose sur le principe de réflexion d'un rayon infrarouge sur la surface de l'échantillon. Le signal est renvoyé sous forme d'un spectre unique, signature propre à chaque échantillon selon ses propriétés physiques et chimiques. Fréquemment employée en sciences du sol, la spectrométrie infrarouge est utilisée dès les années 1970 pour décrire la nature des matières organiques et des argiles. Ses usages sont ordinairement à but prédictif : après calibration avec des données mesurées, cet outil rend très finement compte des concentrations en divers éléments chimiques du sol (carbone, azote, éléments nutritifs, etc.), de propriétés chimiques (pH, CEC) ou physiques comme la texture du sol. Mais ici, on a développé une nouvelle idée : puisque les spectres infrarouges sont le reflet fidèle des propriétés physico-chimiques des sols, on peut les exploiter directement – sans chercher à les élucider – pour apprécier les variations spatiales ou les gradients existants.

Les sols échantillonnés sur chaque site MOS ont été analysés par spectrométrie NIRS/MIRS (Vertex 70, BRUKER) (figure 2) sur le site INRA de Champenoux. Les données spectrales (valeur d'absorbance dans chaque fréquence IR) sont compilées dans un tableau pour chaque site et chaque profondeur. Elles font ensuite l'objet d'un traitement statistique par ACP (analyse en composantes principales) qui permet de mettre en évidence rapidement la variabilité des échantillons entre eux. Ce traitement affecte à chaque échantillon une coordonnée unique sur un « axe » qui illustre son niveau de similarité avec tous les autres échantillons (cf. encadré n° 1). Les coordonnées d'ACP des échantillons sont associées aux coordonnées GPS des points de sondage. On peut ainsi cartographier les résultats d'ACP,

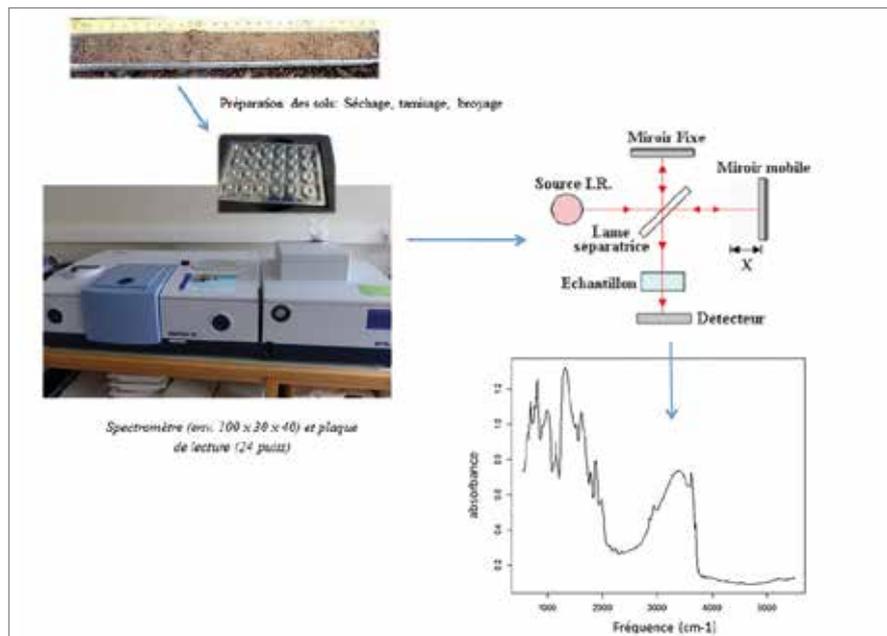


Fig. 2 : étapes depuis le prélèvement de sol sur le terrain jusqu'à l'obtention d'un spectre infrarouge

Mode opératoire : on place quelques mg de sol sec et broyé dans une cupule de la plaque de lecture en métal qu'on introduit dans le spectromètre. En raison de la très faible quantité de matériel utilisé pour l'analyse, la mesure est répétée trois fois pour chaque échantillon de sol (répétition « machine »). L'appareil fournit alors un spectre unique par échantillon, sorte « d'empreinte digitale » du sol.

1 – Méthode statistique pour une approche de la variabilité spatiale du sol par la spectrométrie infrarouge

Principe de l'ACP

L'Analyse en Composantes Principales est une méthode descriptive de statistique multivariée qui permet de traiter des jeux de données quantitatives parfois considérables. Elle en résume l'information sous forme de graphiques qui permettent d'identifier les niveaux de dissemblance/similarité entre les individus en fonction de l'ensemble des variables. L'ACP permet aussi de hiérarchiser les variables entre elles et de mettre en évidence les corrélations entre elles.

Avec un tableau à n individus (lignes) X p variables (colonnes), les relations entre les individus peuvent se représenter graphiquement sur autant d'axes que de variables, donc p axes. Le principe de l'ACP consiste à projeter la variabilité entre les individus sur un minimum d'axes indépendants (les « composantes principales ») correspondant à des combinaisons linéaires des p variables. Les axes d'ACP ne représentent donc pas un facteur particulier mais demeurent interprétables à partir des coefficients des combinaisons entre variables. Le 1er axe de l'ACP est celui qui explique la plus grande part de variabilité entre les données. Les individus sont projetés sur chaque nouvel axe et repérés par des coordonnées. Pour exemple : si 3 axes sont suffisants pour expliquer l'ensemble de la variabilité du jeu de données, les individus ne sont plus caractérisés par p variables mais seulement par 3 coordonnées, une par axe explicatif.

Application aux spectres NIRS/MIRS des sols du réseau

Dans le cas de l'analyse spectrale des sols du réseau MOS, les individus sont les échantillons de sol, identifiés par leur position repérée sur le terrain et par leur horizon, et les variables sont l'ensemble des fréquences d'absorbance des spectres (2500 variables en moyen infrarouge et 4044 en proche infrarouge). Ici, le 1er axe de l'ACP explique toujours plus de 90 % de la variabilité entre individus. Les coordonnées des échantillons sur le 1er axe donnent alors accès rapidement et de façon complète aux éventuels gradients ou hétérogénéités spatiales existantes sur un site.

c'est-à-dire établir des cartes de variabilité des propriétés du sol pour chaque site (figure 3). Cette méthode est appliquée à chaque profondeur de sol échantillonnée pour décrire l'hétérogénéité sur la litière et sur les 20 premiers cm du sol minéral.

Déterminer la disposition des traitements en fonction de l'hétérogénéité du sol et du peuplement

Dans un tableau récapitulatif, chaque point de prélèvement est associé à ses coordonnées issues de l'ACP sur les données spectrales, et aux caractéristiques « peuplements » obtenues après les inventaires sur le terrain. La disposition des 4 traitements au sein de chacun des sites MOS fait ensuite l'objet d'un tirage aléatoire, puis on vérifie statistiquement par analyses de variance les éventuelles interactions entre les traitements et la variabilité du sol et du peuplement :

il ne faut aucune interaction initiale entre l'emplacement des modalités et l'hétérogénéité du site afin de proscrire tout biais expérimental par la suite. Tant que de telles interactions subsistent, on recommence le tirage aléatoire jusqu'à obtenir une configuration qui ne présente aucune relation entre traitements et sol et/ou peuplement. Cette méthode systématique permet d'implanter ensuite les modalités sur le terrain tout en tenant compte de la variabilité existante à l'échelle du site expérimental.

Confirmation méthodologique par les analyses chimiques de sol

Avant la mise en place effective des modalités, nous avons validé cette approche de cartographie des sols par ACP sur les données NIRS-MIRS en confrontant les résultats de la spectrométrie à ceux des analyses classiques, réalisées par le laboratoire

INRA d'Analyses des Sols à Arras : pH (eau et KCl), éléments totaux (C, N, K, Ca, Na, Mg, Mn, Al, Fe, P), CEC, texture et granulométrie. Pour limiter les délais et les frais d'analyses, les échantillons ont été assemblés de manière à n'avoir pour chaque site qu'un seul échantillon composite par traitement et par profondeur (soit 4 échantillons par profondeur). Ces analyses ont bien confirmé l'absence d'effet initial de l'hétérogénéité des sols sur les traitements.

Le réseau MOS a donc été support de la mise au point d'une méthode rapide et efficace d'implantation des dispositifs expérimentaux en forêt (Akroume *et al.*, 2016). La spectrométrie infrarouge permet bien d'appréhender rapidement la variabilité du sol dans sa globalité, même si on n'identifie pas les facteurs chimiques ou physiques discriminants. Le gain de temps apporté par la spectrométrie infrarouge est encore amélioré par le développement récent de spectromètres portables de terrain.

Au-delà de la validation méthodologique, ces analyses ont deux finalités distinctes : (i) servir de références dans le suivi de la fertilité des sols du réseau ; (ii) calibrer les spectres et les données chimiques pour, à l'avenir, utiliser la spectroscopie IR comme un outil fiable de mesures de concentrations d'éléments chimiques (notamment carbone et azote) dans le suivi du réseau MOS.

Description initiale de la diversité fongique des sols

Les communautés fongiques sont essentielles au fonctionnement des écosystèmes forestiers de par leur rôle de décomposeurs des matières organiques et de symbiontes des arbres forestiers dans le cas des champignons mycorhiziens. Le réseau MOS s'intéressant autant à la composante chimique qu'à la composante biologique de la fertilité, la diversité fongique y a été étudiée sur les mêmes échantillons que ceux prélevés pour les analyses chimiques.

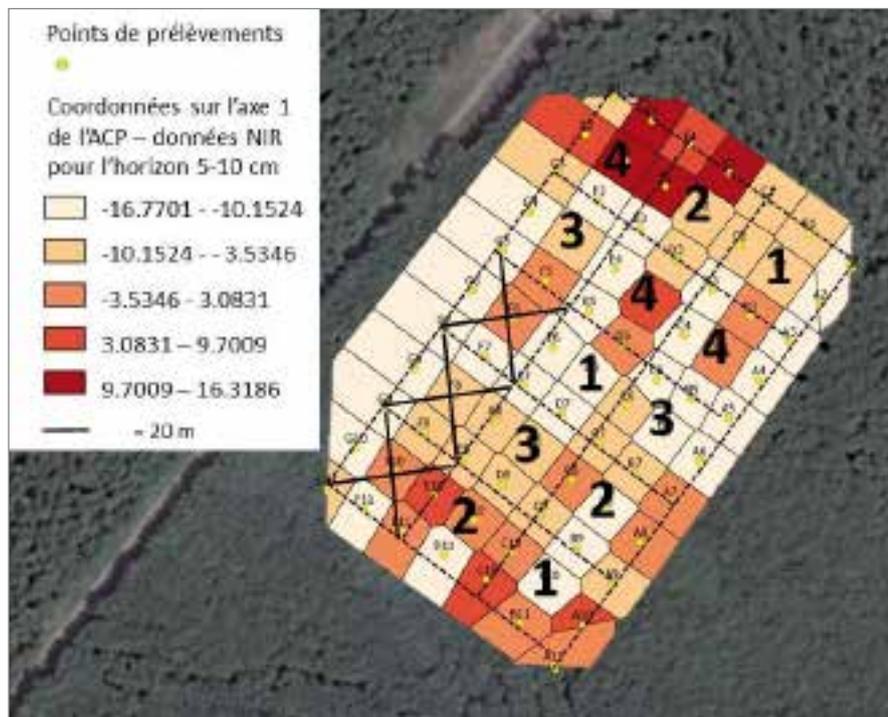


Fig. 3 : exemple de carte de variabilité du sol obtenue à partir des données NIRS pour le site de Ban d'Harol (88)

La disposition des traitements, numérotés de 1 à 4 y a été superposée. La prospection ayant été menée sur plus de 2 ha, 3 placeaux sont surnuméraires (placeaux barrés d'une croix). Les points en jaune représentent les points de sondage. Les coordonnées GPS ont été relevées pour une partie des points, celles des autres points ayant été calculées par interpolation. Ceci explique l'irrégularité de certains polygones.

Les valeurs des « coordonnées ACP » ont été groupées en classes arbitraires et ne représentent pas une « grandeur » particulière. Elles rendent globalement compte de la variabilité du sol sur ce site.

Elle a été appréhendée à partir des méthodes de génomique environnementale : l'ADN présent dans le sol est extrait puis des régions spécifiques des génomes fongiques sont séquencées. L'identification taxonomique peut être effectuée jusqu'au niveau de l'espèce dans le meilleur des cas, sinon au niveau du genre ou de la famille. On obtient une liste des taxons présents par échantillon de sols. Malgré le temps de préparation des échantillons en laboratoire, ces nouvelles technologies sont le moyen le plus pertinent d'étudier les communautés fongiques compte tenu de l'ampleur de l'effort d'échantillonnage sur ce dispositif. Ces méthodes permettent une approche de la diversité locale plus complète que les inventaires classiques d'après l'observation des fructifications.

En effet, étant conditionnés par les cycles saisonniers des espèces et les aléas climatiques, les relevés de carpophores ne reflètent pas la richesse fongique réelle et restreignent l'étude aux seuls champignons épigés ; de nombreux taxons telluriques (notamment responsables de la dégradation des matières organiques) sont alors exclus.

Les méthodes de génomique environnementale donnent accès à la richesse spécifique du sol très longtemps sous-estimée (Horton et Bruns, 2001). Elles offrent l'avantage supplémentaire de pouvoir travailler *a posteriori*, plusieurs mois après prélèvement, sur des échantillons de sols prélevés en toutes saisons puis stockés et conservés à -20 °C pour éviter la dégradation de l'ADN.

Installation et suivi du réseau MOS : de la pelleteuse au laboratoire

Conformément aux critères de sélection des sites, la mise en place des traitements intervient à la première éclaircie (ou la deuxième pour certains sites), après la coupe, une fois que les bois ont été sortis. Les travaux d'exportation des rémanents et des litières ont débuté à l'automne 2013 et s'échelonnent sur les différents sites en fonction des calendriers sylvicoles et de la disponibilité des équipes. Le protocole n'intervient pas dans la sylviculture, qui reste l'affaire du gestionnaire (ONF ou privé), le but étant de s'appuyer sur des pratiques sylvicoles locales en vigueur. Pour la plupart des sites feuillus, la coupe est réalisée manuellement par des

cessionnaires ou affouagistes pour un usage de bois de chauffage. L'exploitation concerne la tige et le houppier jusqu'à la découpe 7 cm et les menus-bois (<7 cm) sont laissés sur place et éparpillés au sol. Cependant sur les deux sites de Compiègne (plantation de chêne sessile et de hêtre), l'exploitation a été effectuée de façon mécanisée et n'a laissé que très peu de rémanents. Les sites Douglas feront aussi l'objet d'exploitation mécanisée avec ébranchage sur place.

L'installation d'un site nécessite environ 70 hommes jours par site : délimitation des placeaux par des piquets implantés aux angles (avec identification par un code couleur + nom du traitement), puis retrait des menus bois et des litières. La maintenance mobilise environ 15 hommes jours par site pour le retrait annuel des litières (modalité sol nu). Les campagnes de terrain sont pilotées par l'unité BEF de l'INRA de Nancy et impliquent du personnel des organismes partenaires : unité IAM de l'INRA de Nancy, laboratoire Ecodiv de Rouen, ONF (ouvriers forestiers et personnel RDI). Sur la plupart des sites, des équipes de la Protection Judiciaire de la Jeunesse (UEAJ) ont apporté un renfort important.



Fig. 4 : exemples de placeaux après retrait des fagots (à gauche) et après retrait de la litière (à droite)

Mise en place des traitements *in situ*

Les menus-bois et houppiers non exploités sont évacués hors des placeaux à modalité *sans rémanent et sol nu* sous forme de fagots le long des cloisonnements (figure 4). Les retraits de litière sont effectués après l'évacuation des fagots, en soufflant les feuilles de façon à les entasser sur les cloisonnements pour faciliter leur sortie des placeaux. L'utilisation de souffleuses à feuilles (Stihl BR 550) permet d'éviter le décapage violent des racines fines superficielles et l'altération de l'horizon organique que pourraient provoquer l'emploi de râtaux ou d'une herse. Les litières sont évacuées hors du dispositif au fur et à mesure par un quad léger afin de minimiser les impacts de tassement.

Les fagots de menus-bois évacués sont pesés à l'aide d'un peson accroché au bras d'une pelleteuse (figure 5). Pour chaque placeau *sol nu*, les quantités de litières exportées sont évaluées avant le soufflage : la litière est prélevée manuellement sur un m² et pesée à raison de 9 points par placeau, puis on extrapole à l'hectare. En masse sèche, la quantité de menus-bois exportés

varie entre 10 et 20 t/ha selon les sites ; pour les litières, elle varie de 5 à 12 tonnes/ha. Des analyses de composition chimique du bois et des litières sont réalisées en parallèle afin de déterminer précisément la minéralomasse exportée par chacun des traitements.

Sur les modalités de *compensation*, les épandages de cendres ont débuté en 2015 et ont été réalisés manuellement (figure 6). La quantité de cendres apportée (1,5 à 2 t/ha) est équivalente à la quantité d'éléments nutritifs exportés par la récolte des houppiers. Remarque : les cendres étant considérées comme déchets par la réglementation actuelle, leur épandage en forêt à titre expérimental est subordonné à l'obtention d'une autorisation spéciale de la part des DREAL concernées, après analyse des teneurs en métaux lourds pour en vérifier l'innocuité.

En janvier 2017, 10 des sites feuillus sont installés complètement et régulièrement suivis. Les traitements sur les sites de l'Allier (Tronçais et Grosbois) ne sont pas encore mis en place et les sites douglas sont en cours de chantier.

Suivi du réseau

Le dispositif fait l'objet de nombreux suivis faisant appel à diverses disciplines et à des technologies de pointe :

- croissance des arbres et évolution de la productivité du peuplement ;
- fertilité et fonctionnement du sol : minéralisation du carbone et de l'azote, concentrations des éléments chimiques, activités enzymatiques liées à la dégradation de la matière organique par les microorganismes ;
- richesse et diversité biologique : inventaire de macro – et mésofaune (lombricidés, enchytréides, etc.), biomasse microbienne, diversité fongique par inventaires de fructifications et par génomique environnementale.

Pour une compréhension complète des processus en jeu, certains sites sont équipés de stations météorologiques et de sondes (Decagon EC 5) pour le suivi de l'humidité du sol à différentes profondeurs. Le suivi des sites mobilise également une plate-forme mobile, M-POETE², permettant de faire des analyses de laboratoire *in situ* et équipée d'outils

² Mobile Platform for the Observation and the Experimentation on Terrestrial Ecosystems



Fig. 5 : pesée d'un fagot à l'aide d'un peson fixé au bras de la pelleteuse



Fig. 6 : épandage manuel de cendres sur un site MOS

2 – Quelques résultats

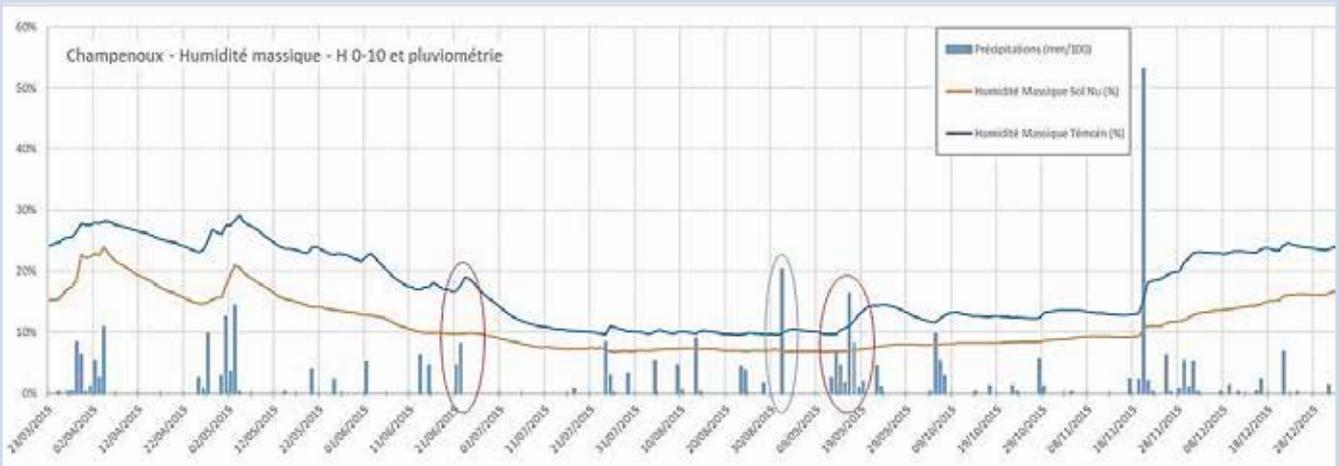
Sans litière, le sol a soif... mais ne boit plus...

Sur le site de Champenoux, l'humidité du sol sur les 10 premiers cm et la pluviométrie sont suivies mensuellement depuis mars 2015. Le sol sans litière (courbe marron) est toujours nettement plus sec que le sol témoin (courbe bleue). Pas étonnant, étant donné le rôle de rétention de l'humidité de la litière forestière...

En revanche, alors qu'humidité et pluviométrie sont étroitement corrélées, on a observé, depuis la sécheresse du printemps 2015, que le sol sans litière ne réagissait plus aux

précipitations : il a plu mais l'humidité du sol restait très faible (ellipses rouges). Noter que les sols ont connu pendant l'été 2015 un important niveau de sécheresse ce qui explique que même les sols témoin n'aient pas vu leur humidité augmenter lors de la pluie d'orage du 31/08/2015 (ellipse bleue), comme une éponge trop desséchée qui perd sa capacité d'absorption immédiate.

Néanmoins, ils réagissent aux précipitations suivantes contrairement aux sols nus qui ne voient leur humidité ré-augmenter que très lentement.

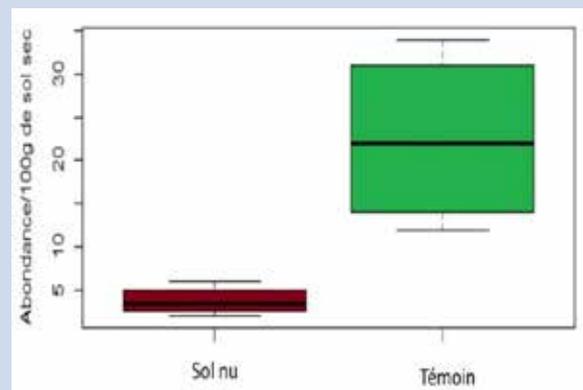


Un impact sur la faune du sol ?

La biomasse de vers enchytréides (mésafaune) a été estimée en 2015, soit un an après l'installation, sur 6 sites (3 sites hêtre et 3 sites chêne) dans l'horizon de surface (0-5cm) et comparée entre placeau témoin et sol nu.

Ces premiers résultats indiquent une baisse significative de l'abondance des enchytréides quand la litière a été retirée.

Deux causes possibles : la disparition de la ressource nutritive et/ou, plus probablement, la disparition de l'habitat favorable (Élie, 2015).



(d'après Elie, 2015)

divers : drone, LIDAR (aérien et terrestre), spectromètre infrarouge, etc. Pour prendre en compte les effets à très court terme, des échantillons de sols sont prélevés tous les ans à l'automne et conservés ; ils feront l'objet d'analyses des potentiels de minéralisation de l'azote et du carbone, ainsi que d'analyses de la biomasse et de la diversité fongique.

Les premières campagnes de suivi ont déjà fourni quelques informations intéressantes concernant les activités biologiques des microorganismes, ou encore la faune et l'humidité du sol (cf. encadré 2).

Quelques projets en cours : du microorganisme au peuplement forestier...

Le réseau est devenu support de divers projets scientifiques ou plus appliqués. Depuis sa mise en place en 2013, plusieurs stages universitaires (M1, M2) ont été effectués dans ce cadre, ainsi qu'une thèse achevée en 2015 sur l'élaboration du réseau et les effets à très court terme des manipulations de matière organique (Akroume, 2015). Deux thèses ont débuté en 2015, respectivement sur les liens entre fonctionnement de la diversité fongique et phénologie des arbres, et sur les impacts des exportations de biomasse sur la macrofaune. Le projet BRIDGE³ (2015-2018) de l'INRA Nancy s'appuie aussi sur le réseau pour étudier les mécanismes de la croissance racinaire du chêne, du hêtre et du douglas en fonction de la disponibilité en nutriments et en eau.

Enfin le projet RESPIRE (REcolte des menus bois en forêt : Potentiel, Impact et Remédiation par Epanchage de cendres), auquel contribue l'ONF RDI, a été spécialement bâti autour du réseau MOS et pour exploiter les données qui y sont récoltées.

Le champ des domaines impliqués est vaste, depuis la biogéochimie et l'écologie des sols jusqu'à l'économie

forestière et la simulation d'itinéraires sylvicoles. Un des volets en cours consiste estimer la biomasse et la minéralomasse des menus-bois exportés sur des itinéraires sylvicoles complets, en faisant différentes hypothèses d'exploitation des menus-bois. On simulera différents scénarios sylvicoles à l'aide des modèles de croissance Fagacées (pour hêtre et chêne), en partant des peuplements et des exportations réels des sites MOS et en faisant varier les quantités de menus-bois exportés, les durées de rotation, l'intensité des coupes, etc. Ce volet fera aussi appel à l'outil ForEnerChips, conçu pour évaluer les bilans énergétiques et les exportations minérales sur l'ensemble de la filière de mise à disposition de biomasse forestière pour l'énergie (Bilot, 2014). Ces simulations aideront à la réflexion pour la définition d'itinéraires « durables » adaptés aux contextes étudiés.

Ce qu'on attend de ce dispositif

Le réseau MOS permettra d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement biogéochimique des sols forestiers, leur faune et leurs communautés microbiennes, et sur la croissance aérienne et racinaire des arbres. Par son approche pluridisciplinaire, il a des ambitions relevant autant des sciences fondamentales que des sciences forestières appliquées : progresser en taxonomie grâce, en partie, aux méthodes de génomique environnementale, en élargissant les inventaires à d'autres groupes (insectes, flore, etc.) et aux espèces inféodées au bois mort ; comprendre les liens entre fertilité chimique, diversité taxonomique et fonctionnement des sols (processus de dégradation des matières organiques, flux d'éléments nutritifs, etc.) ; établir des relations entre exportation de biomasse et productivité des peuplements ; tester la pertinence des mesures de remédiation. Plus généralement, un dispositif de cette ampleur est indispensable à la compréhension

des effets des types de gestion sur certains écosystèmes forestiers et à l'évaluation des services rendus par ces écosystèmes.

L'intégration des composantes de richesse spécifique et diversité fonctionnelle des sols dans les modèles de croissance/fertilité existants facilitera la compréhension des processus de croissance des peuplements. À plus longue échéance, le réseau MOS aura vocation à l'élaboration d'un ou plusieurs indicateurs de sensibilité des sols aux exportations de menus-bois prenant en compte ces différentes composantes. Appréhender le plus finement possible les facteurs de maintien de la fertilité des sols contribuera ainsi à proposer aux sylviculteurs des pistes de gestion, et des outils de diagnostic adaptés aux peuplements et aux contextes pédoclimatiques.

Emila AKROUME ^{(1) (2)}

Bernd ZELLER ⁽²⁾

Marc BUÉE ⁽³⁾

Laurent SAINT-ANDRÉ ⁽²⁾

Arnaud REICHARD ⁽²⁾

Christine GEHIN ⁽²⁾

Cyrille BACH ⁽³⁾

(1) ONF, pôle RDI de Dole

(2) INRA-BEF 54280 Champenoux

(3) INRA-IAM 54280 Champenoux

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont permis la mise en œuvre de ce projet, tout particulièrement les agents patrimoniaux et responsables d'UT : Henri Juif, Michel Leblanc, Pascal Debailleuil, Yves Poirot, Claude Aubailly, Eric Keiser, Élise Vial, Timothée De Ferrières, Alexis Guillon, Bruno Liniger ; les collègues de la forêt privée : Laurent Bissonnier (expert forestier), Bernard Catry (CRPF), A. Barthélémy (expert forestier) ; et les UEAJ de Belfort, Besançon, Montataire, Nancy, Sarreguemines, Strasbourg qui ont fourni un soutien essentiel pour les chantiers de terrain.

³ Biomass Removal Impact on soil Diversity, Geochemistry and Tree Ecophysiology

Financement et partenaires du réseau MOS

Financement

Le réseau MOS a vu le jour grâce au financement de l'ADEME (appel à projet REACTIF 2013) dans le cadre des projets :

- RESPIRE (2014-2016) : REcolte des menus bois en forêt : Impacts et Remédiation par Epanchage
- INSENSÉ (2014-2016) : INDicateurs de SENSibilité des Écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse

Il a été installé à l'aide de la plateforme mobile M-POETE (Mobile Platform for the Observation and the Experimentation on Terrestrial Ecosystems) financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le FEDER dans le cadre de l'infrastructure ANAEE-F. Les unités UR1138 BEF et UMR1136 IAM font l'objet d'un financement par l'ANR dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » (ANR-11-LABX-0002-01, Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Organismes partenaires

UR INRA Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, UMR INRA-Université de Lorraine Interactions Arbres-Microorganismes, UMR INRA-Université de Lorraine Laboratoires Sols-Environnement, département RDI de l'ONF, Laboratoire Ecodiv Université de Rouen.

Porteurs

Bernd Zeller (INRA-BEF), Emila Akroume (ONF, anciennement INRA-BEF et IAM), Marc Buée (INRA-IAM), Laurent Saint-André (INRA-BEF).

Responsables réseau MOS : Bernd Zeller, Laurent Saint-André

Contributeurs

Michaël Aubert (Université de Rouen), Cyrille Bach (INRA-IAM), François Élie (Université de Rouen), Christine Gehin (INRA-BEF), Dominique Gérard (INRA-EEF), Marine Leblanc (UCFF), Joseph Levillain (INRA-EEF), François Maillard (INRA-IAM), Noémie Pousse (ONF), Cyrille Rathgeber (INRA-LERFOB), Arnaud Reichard (INRA-BEF), Claudine Richter (ONF), Lucie Vincenot (Université de Rouen)

Bibliographie

Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L., 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* vol. 348, pp. 124–141

Akroume E., 2015. Élaboration d'un dispositif expérimental de manipulations de matière organique sur le long terme en forêt tempérée et évaluation des impacts à très court terme des exportations sur le sol. Thèse de doctorat. Nancy : AgroParisTech.

Akroume E., Zeller B., Buée M., Santenoise P., Saint-André L., 2016. Improving the design of long-term monitoring experiments in forests: a new method for the assessment of local soil variability by combining infrared spectroscopy and dendrometric data. *Annals of Forest Science*, vol. 73 (4) pp. 1005-13

Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2004. Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Tâche D1 : Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. ECOFOR n° 2002.17 INRA n° 4154 B

Bilot N., 2014 Comment raisonner la performance énergétique et la durabilité de la filière de mise à disposition de plaquettes forestières pour l'énergie ? *Rev. For. Fr.* vol. 66 (4) pp. 584-588

Bengtsson J., Persson T., Lundkvist H., 1997. Long-term effects of logging residue addition and removal on macroarthropods and enchytraeids. *J. Appl. Ecol.* Vol. 34, pp. 1014–1022

Cacot E., Eisner N., Charnet F., Leon P., Nicolleau C., Ranger J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers : Ademe. 20 p.

Elie F., 2015. Étude de l'augmentation de prélèvements de rémanents forestiers sur la faune du sol. Mémoire de stage de master 2. Université de Rouen, laboratoire Ecodiv

Hartmann M., Howes C.G., VanInsberghe D., Yu H., Bachar D., Christen R., Nilsson R.H., Hallam S.J., Mohn W.W., 2012. Significant and persistent impact of timber harvesting on soil microbial communities in Northern coniferous forests. *The ISME Journal* vol. 6, pp. 2199–2218

Helmissaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B., 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology and Management*, vol. 261, pp. 1919–1927

Horton T. R., Bruns T. D., 2001. The molecular revolution in ectomycorrhizal ecology: peeking into the black-box. *Molecular ecology*, vol. 10(8) pp. 1855–1871

Landmann G. et Nivet. C (coord.), 2014. « Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. » Rapport final projet RESOBIO. ADEME, Paris : ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt – GIP Ecofor

Laclau J.-P., Levillain J., Deleporte P., Nzila, J. de D., Bouillet J.-P., Saint André L., Versini A., Mareschal L., Nouvellon Y., Thongo M'Bou A., Ranger J., 2010. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management* vol. 260, pp. 2148–2159

Mahmood S., Finlay R.D., Erland S., 1999. Effects of repeated harvesting of forest residues on the ectomycorrhizal community in a Swedish spruce forest. *New Phytologist* vol. 142, pp. 577–585

MEEM, 2017. Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2016. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. Datalab n° 8, 76 p.

Mendham D., Sankaran K., O'Connell A., Grove T., 2002. Eucalyptus globulus harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 34, pp. 1903–1912

Nambiar E. K. S., Cossalter C. et Tiarks A. E. (éd.), 1999. Site management and productivity in tropical plantation forests: workshop proceedings, 16–20 February 1998, Pietermaritzburg, South Africa. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research.

Nzila J. de D., Bouillet J.-P., Laclau J.-P., Ranger J., 2002. The effects of slash management on nutrient cycling and tree growth in Eucalyptus plantations in the Congo. *Forest Ecology and Management* vol. 171(1) pp. 209–221

O'Connell A., 2004. Impact of harvest residue management on soil nitrogen dynamics in Eucalyptus globulus plantations in south western Australia. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 36, pp. 39–48

Powers R., Scott D., Sanchez F., Voldseth R., Page-Dumroese D., Elioff J., Stone D., 2005. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. *For. Ecol. Manage.* vol. 220, pp. 31–50

Smolander A., Kitunen V., Tamminen P., Kukkola M., 2010. Removal of logging residue in Norway spruce thinning stands: Long-term changes in organic layer properties. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 42, pp. 1222–1228

Tamminen P., Saarsalmi A., Smolander A., Kukkola M., Helmisaari H.-S., 2012. Effects of Logging Residue Harvest in Thinnings on Amounts of Soil

Carbon and Nutrients in Scots Pine and Norway Spruce Stands. *Forest Ecology and Management* vol. 263, pp. 31–38

Thiffault E., Hannam K.D., Paré D., Titus B.D., Hazlett P.W., Maynard D.G., Brais S., 2011. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests - A review. *Environmental Reviews*, vol. 19, pp. 278–309

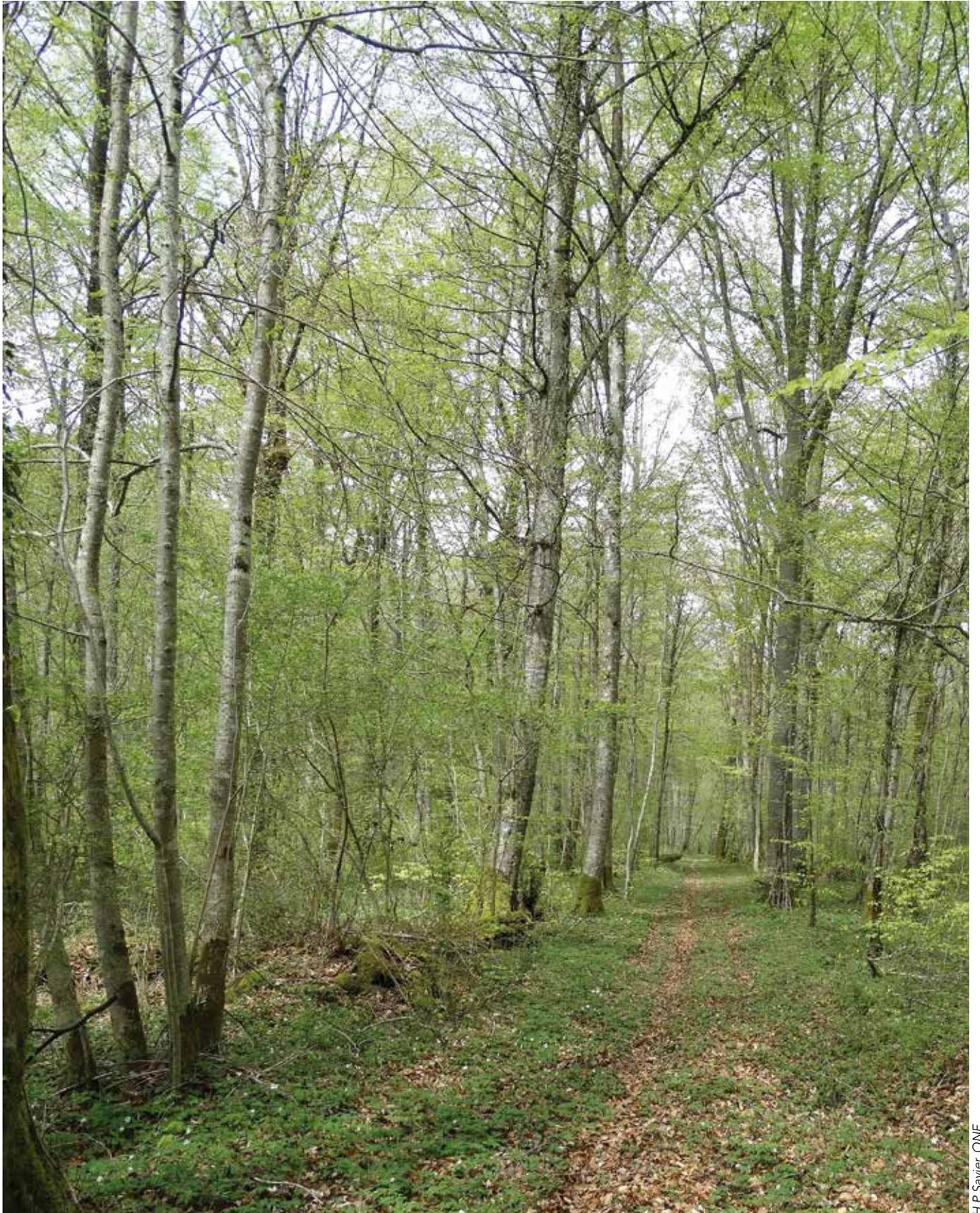


INRA-BEF



INRA-BEF

Mise en oeuvre des modalités expérimentales sur les sites de Compiègne (en haut) et Champenoux (en bas)



H.P. Savier, ONF

Dossier



Tassement, orniérage, machinisme forestier et organisation des exploitations en forêts feuillues de plaine et collines

E. Ulrich, ONF

Douze ans après notre dossier sur les « Conséquences des tassements du sol dus à l'exploitation forestière », faisons le point sur les évolutions vertueuses des machines forestières, avec un regard résolument pratique et réaliste. Et tirons-en les enseignements pour l'organisation des exploitations.

- p. 24 Introduction au dossier
par Erwin Ulrich
- p. 28 État des connaissances sur le mécanisme de tassement et d'orniérage et sur la restauration des sols
par Erwin Ulrich, Philippe Ruch et Noémie Pousse
- p. 37 Évolutions récentes des engins forestiers d'exploitation vis-à-vis des impacts de tassement et d'orniérage
par Erwin Ulrich, Dominique Goetsch, Philippe Ruch, Didier Pischedda
- p. 50 Étude de cas – Exigences d'emploi d'une machine spécialisée : le porteur chenillard « Elliator »
par Erwin Ulrich, Dominique Goetsch, Didier Pischedda
- p. 54 Étude de cas – Exigences d'emploi d'une machine spécialisée : le chenillard combi « Lightlogg C »
par Erwin Ulrich, Dominique Goetsch, Didier Pischedda
- p. 58 Influence de l'organisation des cloisonnements sur la fréquentation et les tonnages supportés au cours de la vie d'un peuplement de plaine – Approche théorique
par Christophe Ginet et Philippe Ruch
- p. 66 Tassement et orniérage : enseignements opérationnels pour l'organisation des exploitations
par Erwin Ulrich, Philippe Ruch, Didier Pischedda, Emmanuel Cacot, Noémie Pousse, Maryse Bigot
- p. 73 Bibliographie de l'ensemble du dossier

Tassement, orniérage, machinisme forestier et organisation des exploitations en forêts feuillues de plaine et collines

Introduction au dossier

En plaine, le tassement et l'orniérage sont les principaux impacts environnementaux négatifs et durables que provoquent les engins d'exploitation dans les parcelles forestières. En zone de montagne, le principal problème est l'érosion. Ces impacts sont observés par les gestionnaires, opérateurs et autres usagers de la forêt. Les réduire est depuis maintenant presque 40 ans un vrai défi pour le machinisme forestier, pour les opérateurs et pour les gestionnaires.

En 2005, les *RenDez-Vous techniques* ont consacré un premier dossier « Conséquences des tassements du sol dus à l'exploitation forestière » (RDVT n° 8).

Douze ans après, où en est-on des connaissances pratiques concernant l'effet de l'exploitation sur les sols, quel est l'état des évolutions en machinisme forestier, quels sont les retours d'expériences pratiques et les conclusions que l'on peut en tirer ?

Ce dossier est orienté vers la pratique, car les gestionnaires ont toujours des attentes très fortes, notamment vis-à-vis des constructeurs. Même si les conséquences du tassement/orniérage en termes de fonctionnement des sols ne sont pas encore toutes élucidées, on peut admettre que ce qu'on en sait aujourd'hui grâce à la recherche est largement suffisant pour agir en faveur d'une diminution importante des impacts. Les indications du guide PROSOL (Pischedda, coord., 2009) sont désormais bien connues et partagées à l'ONF mais, au-delà, quelles conclusions pouvons-nous tirer des connaissances les plus récentes pour les intégrer dans le quotidien des chantiers forestiers ? Il est nécessaire de faire régulièrement le point sur ce sujet.

Nous commençons donc par dresser l'état des connaissances sur les mécanismes de tassement et orniérage et sur la restauration des sols. Puis nous faisons le point sur les évolutions récentes proposées par les constructeurs de machines forestières, en portant sur ces développements un regard critique et réaliste d'un point de vue opérationnel, pour en tirer des enseignements utiles aux gestionnaires et aux opérateurs.

Dans le même esprit, nous proposons ensuite deux études de cas qui mettent en évidence les difficultés d'emploi de machines « à faible impact » spécialement conçues pour le travail sur sol sensible humide. Enfin nous examinons l'influence de l'organisation des cloisonnements et nous essayons de donner quelques conclusions opérationnelles.

Ce dossier se concentre uniquement sur les contextes de plaine et collines, car ils représentent l'essentiel des surfaces concernées par des impacts importants, en rapport avec des sols limoneux à argileux. Sont également le plus souvent concernés les peuplements feuillus, où il est difficile de réaliser un « paillage » de rémanents suffisamment épais sur les cloisonnements. C'est pourquoi, dans ces peuplements, les cloisonnements présentent souvent des portions plus ou moins longues de sol nu (= non enherbé), avec une couche d'humus peu épaisse voire absente. C'est dans ces situations que l'exigence de progrès est la plus importante.

Erwin Ulrich
ONF, pôle RDI de
Fontainebleau-Compiègne



L E X I Q U E

Pour l'ensemble du dossier

Abatteuse : voir « machine de bûcheronnage »

Bogie (ou boggie) : ensemble de roues montées sur un balancier, facilitant notamment le passage des obstacles ; 2 roues par bogie sur les engins forestiers

BTP : secteur économique des bâtiments et travaux publics

Charge utile : c'est la masse maximale de bois qu'un engin est autorisé à porter. Elle est définie par le constructeur

Chenillard : véhicule pourvu de chenilles motrices

Couche holorganique : horizon constitué principalement de débris ou fragments végétaux morts (feuilles, aiguilles, racines, matériel ligneux) plus ou moins transformés en conditions aérobies. Cet horizon est toujours situé à la partie supérieure du sol minéral.

Débusqueur : engin forestier à 4 ou 6 roues permettant de sortir (tracter) des grumes en toute longueur pour les mettre généralement sur un lieu de dépôt, en forêt ou en bord de route

Densité apparente (de la terre fine) : poids de la terre fine rapporté au volume total de sol (somme du volume de la terre fine, des cailloux et des vides)

Dessiccation : action de dessécher

ETF : entreprise (ou entrepreneur) de travaux forestiers

Humectation : action de mouiller

Klemmbank (allemand) ou Clambunk (anglais) : très grande pince ouverte vers le haut, montée sur un débusqueur ou à la place des ranchers d'un porteur, permettant de pincer une ou plusieurs grumes ou des arbres entiers, afin de les transporter vers la place de dépôt ; les produits traînent au sol

Macroporosité : volume des espaces vides de dimension supérieure à environ 50 µm de diamètre (seuil variable selon les auteurs) par rapport au volume total apparent du sol. Ces espaces vides de grande dimension sont particulièrement importants pour les transferts d'eau dans les sols

Machine de bûcheronnage : engin permettant d'abattre et éventuellement d'ébrancher et de découper un arbre en tronçons

Masse à vide et charge utile : les masses à vide indiquées dans ce dossier correspondent aux données des constructeurs. Il est toutefois à signaler, qu'il n'y a pas de « normalisation » pour le pesage des engins. Ainsi, il y a de réelles différences entre la masse à vide et celle de l'engin opérationnel (tous les pleins faits + le grappin + les options type lame, treuil...)

Pince à grumes : voir « klemmbank »

Poids à vide : voir « masse à vide »

Porosité : volume total des espaces vides par rapport au volume total apparent du sol (= volume des particules solides + volume des espaces vides)

Porteur : engin permettant de transporter (ou débarder) du bois à partir du lieu d'abattage ou de stockage à l'intérieur des parcelles vers une place de dépôt ; les bois sont portés et ne traînent donc pas au sol. Les porteurs peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur charge utile (FCBA) :

- Petite capacité : jusqu'à 10 tonnes de charge
- Moyenne : 11 à 13 tonnes
- Grande : 14 à 17 tonnes
- Très grande : 18 tonnes et plus

Ranchers : barres verticales disposées en bordure de la plate-forme arrière des porteurs ou des camions, destinées à retenir les charges de grande longueur, comme des grumes

Rémanents : sous-produits (branches, cimes...) qui ne sont pas exportés du parterre de la coupe

Skidder (anglais) : voir « débusqueur »

Structure du sol : arrangements en 3 dimensions des particules minérales et organiques d'un sol. Ces assemblages créent des espaces vides de forme, taille et connectivité variables

Tracks : mot anglais (très utilisé par les professionnels) désignant des semi-chenilles qui se montent sur des bogies

LEXIQUE

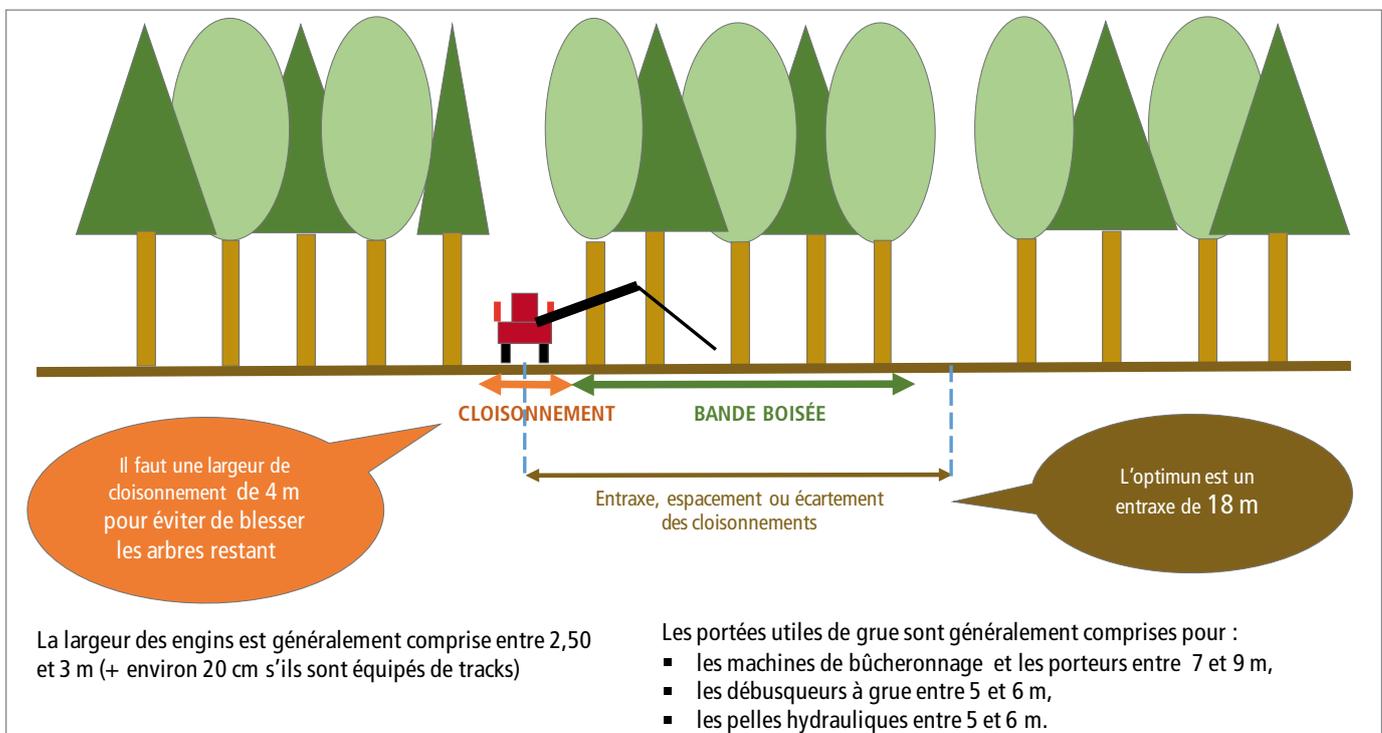
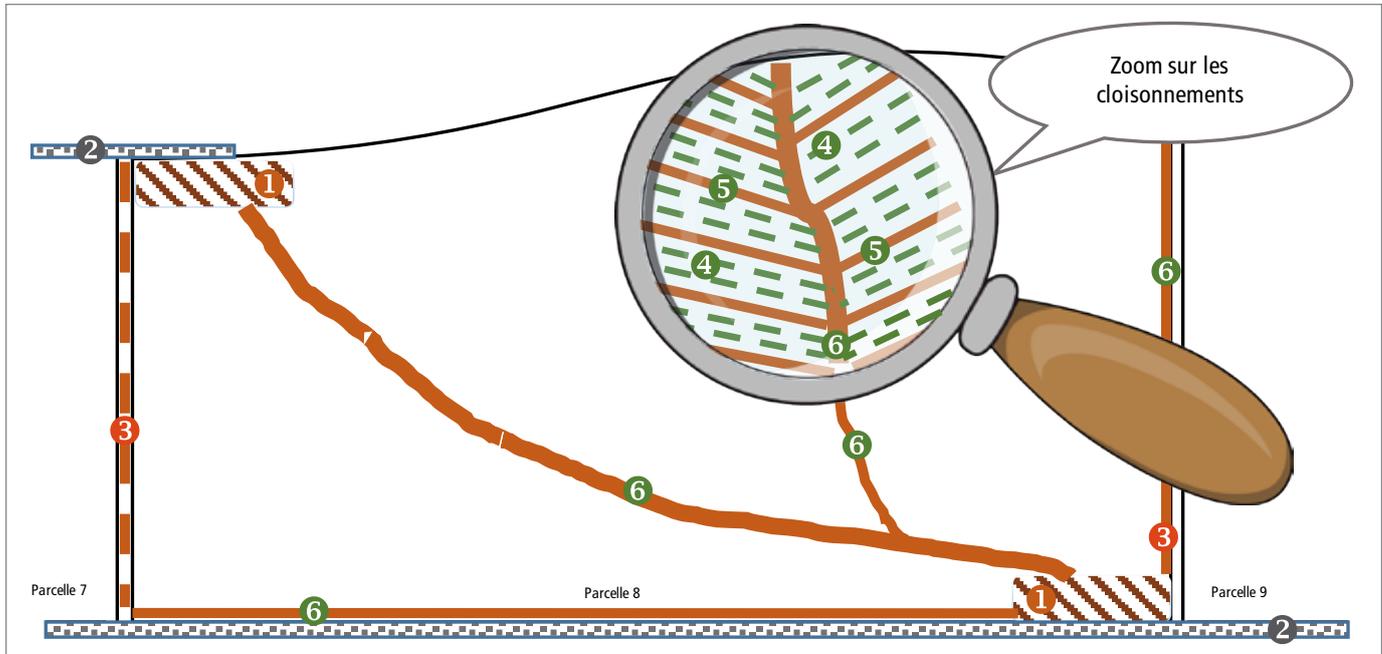
Lexique spécifique au réseau de circulation des engins et vidange des bois

D'après Philippe Ruch, FCBA

Terme	Définition	Synonyme	N° Schéma ci-contre
Voies de vidange	Ensemble des pistes, chemins et cloisonnements permettant d'acheminer le bois jusqu'à une place de dépôt.	Réseau de vidange	
Place de dépôt	Elle permet le stockage des bois et elle est accessible aux camions pour charger les bois débardés.	Aire de chargement Aire de stockage	1
Route forestière	Elle est par définition accessible aux grumiers, aux engins et véhicules.	Piste à grumier	2
Ligne de parcelle	Voie séparant deux parcelles.	Appelée parfois sommière	3
Cloisonnements	Ce sont des couloirs de circulation ouverts dans un peuplement. Ils sont caractérisés par un sens, une largeur et un entraxe (qui peut encore être appelé espacement, pas de cloisonnement, entraxe de cloisonnement ou écartement) : c'est la distance moyenne entre deux axes de cloisonnement. On distingue les cloisonnements sylvicoles et les cloisonnements d'exploitation.	Couloir de cloisonnement	
Cloisonnements sylvicoles	Ils sont établis pour faciliter la réalisation des travaux mécanisés et manuels dans le jeune âge du peuplement (nettoiement, dépressage...). Une largeur de 2,20 m est nécessaire et suffisante pour permettre la circulation des tracteurs équipés d'outils.	Cloisonnement Couloirs culturaux (sylvicoles) Couloir de cloisonnement	4
Cloisonnements d'exploitation	Ils sont empruntés par les engins d'exploitation forestière pour abattre, débusquer et débarder les bois. Une largeur de 4 m est nécessaire et suffisante pour permettre leur circulation.	Cloisonnement Layon d'exploitation Couloir de cloisonnement	5
Cloisonnement d'exploitation principal	Cloisonnement sur lequel d'autres cloisonnements débouchent et qui permet d'acheminer les bois jusqu'à une place de dépôt.	Collecteur Piste principale Tournière Chemin de débardage	6

Autres notion utiles :

- Largeur du cloisonnement + largeur de la bande boisée = espacement encore appelé entraxe, écartement des cloisonnements ou pas de cloisonnement.
- Le rapport de la largeur du cloisonnement/entraxe correspond au % de surface occupée par les cloisonnements (encore appelé emprise des cloisonnements). Elle correspond théoriquement à la surface circulée si les engins ne quittent pas les cloisonnements. Par exemple, pour un cloisonnement de 4 m de large et un entraxe de 16 m, il est de 25 % (4 m/16 m).
- Portée utile des grues : il s'agit de la distance jusqu'à laquelle les engins peuvent travailler correctement avec leur grue.



État des connaissances sur le mécanisme de tassement et d'orniérage et sur la restauration des sols

Avant de parler d'évolutions du mécanisme forestier et d'organisation des exploitations pour réduire les impacts au sol, il est nécessaire de bien définir et caractériser ces impacts, et de comprendre les mécanismes en cause. C'est l'objet de cet article, qui va un peu plus loin que la simple définition en proposant des exemples tirés du quotidien des gestionnaires et des opérateurs.

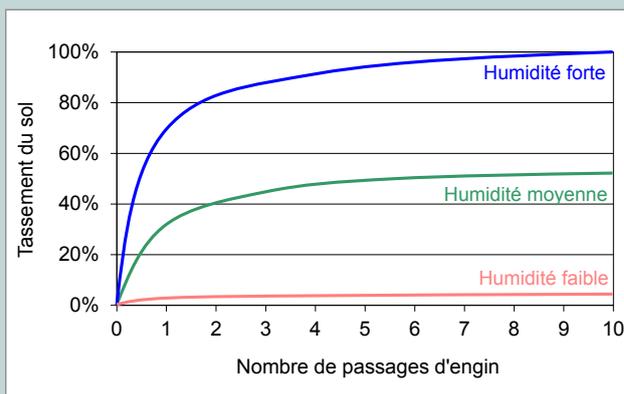
Afin de ne pas encombrer le texte avec les notions de base, des définitions simples du tassement et de l'orniérage sont données dans l'encadré 1. L'encadré 2 (+ planche 1) explique comment mesurer la profondeur d'une ornière et plus généralement comment caractériser les impacts au sol, pour pouvoir les comparer au sein d'un même chantier ou dans des chantiers différents, et se donner des repères en termes d'acceptabilité.

La problématique du tassement : état des lieux

Le tassement est très visible lorsqu'il se manifeste par des ornières. En revanche le tassement sans ornière n'est pas facile à observer sans mesures spécifiques et coûteuses, avec des appareils sophistiqués. Ce type de tassement existe dans des parcelles que des engins ont parcourues sans organisation particulière, et peut se généraliser à l'ensemble de la surface à l'occasion d'interventions successives. Or la grande « révolution » de l'utilisation de machines en forêt s'est faite après la Deuxième Guerre mondiale et, depuis lors, la plupart des parcelles bénéficiant d'une gestion forestière ont connu

1 – Définitions du tassement et de l'ornière

Le tassement est la diminution de volume d'un sol sous l'effet d'une surcharge, par expulsion d'eau interstitielle ou réarrangement de sa texture. Le tassement en lui-même n'est pas obligatoirement associé à l'orniérage. Il existe plusieurs intensités de tassement, les plus importantes étant quasi irréversibles dans un laps de temps considéré comme acceptable par les gestionnaires forestiers, c'est-à-dire, dans la plupart des cas, la période séparant deux interventions (4-10 ans). Les tassements les plus importants sont le plus souvent la conséquence d'un trop grand nombre de passages d'engin par rapport à la capacité de résistance instantanée du sol à la contrainte appliquée. Ils provoquent la compaction en profondeur, c'est-à-dire une prise en masse totale, qui ne peut plus être réduite en volume, car dépourvue en pores. L'humidité du sol influence fortement sa capacité de résistance : plus le sol est humide, moins il résiste au tassement (voir figure).



Représentation schématique du tassement du sol en fonction du nombre de passages d'engin et de l'humidité du sol, d'après Pishedda et al. (2009)

L'ornière doit probablement son nom au mot latin orbita, qui signifie « traces creusées par des roues ». L'Académie Française en donne cette définition : « traces profondes que laissent les roues d'un véhicule dans les chemins de terre ».

L'orniérage est forcément précédé par un tassement du sol, à des degrés variables selon l'état d'humidité.

Une ornière est caractérisée par une partie déformée du sol, avec un niveau enfoncé par rapport à celui du terrain naturel. Sa largeur correspond souvent à la largeur des roues qui l'ont provoquée.

Plus une ornière est profonde, plus sa formation s'accompagne d'un déplacement de matériaux mélangés qui se déposent sur les bords et constituent des « bourrelets ». Les bourrelets résultent en partie de l'éjection de sol minéral extrait par l'action mécanique des roues/chenilles ou de sol superficiellement liquéfié, et ils résultent aussi en partie du sol poussé latéralement par les roues lorsque l'ornière gagne en profondeur avec un nombre croissant de passages sur la même voie.

Une ornière peut se former dès le premier passage d'engin, le plus souvent sur sol saturé en eau, ou après plusieurs passages sur un sol moins humide. Selon la texture du sol, cela peut aussi se produire sur un sol sec (par exemple sur des sols sableux) moyennant un nombre de passages plus élevé.

plusieurs coupes faisant intervenir des machines, sans règles précises d'accès aux parcelles. Cacot et Peuch (2006) dressent un constat assez représentatif de cette période, après avoir analysé 48 chantiers dans toute la France. Hors chantiers exploités par câble-mat, les résultats sont les suivants : les parcelles en coupe rase de feuillus ou de résineux ont été parcourues en moyenne sur 30 à 35 % de leur surface, avec des maxima pouvant atteindre 47 à 51 %. Pour les chantiers d'éclaircies de feuillus ou de résineux la proportion de surface circulée est en moyenne de 34 à 36 %, avec des maxima de 59 à 60 %. Les impacts sont donc potentiellement très importants !

C'est entre la fin des années 80 et la fin des années 90 que les utilisateurs de la forêt ont pris conscience du problème grandissant de l'impact des engins au sol (figure 1). La suite des tempêtes de décembre 1999 a achevé d'alarmer gestionnaires et constructeurs, avec trop d'exploitations mal organisées et des impacts très visibles (et choquants pour le public).

Dès lors, les gestionnaires n'ont eu de cesse de réclamer des améliorations notables sur le machinisme forestier pour réduire fortement les impacts. La recherche forestière est également intervenue avec des analyses approfondies des conséquences à long terme de ces impacts sur l'hydrologie, les échanges gazeux et le cycle nutritif des sols, et en étudiant également les durées de rétablissement des sols (Lamandé et al., 2005 ; Goutal-Pousse et al., 2014).

Le règlement national d'exploitation forestière de l'ONF (2008) et le règlement national des travaux et services forestiers de l'ONF (2010) exigent la préservation des sols, évoquant la nécessité d'intervenir avec des moyens adaptés, la possibilité de clauses particulières et la circulation sur les cloisonnements et couloirs désignés (quand ils existent).

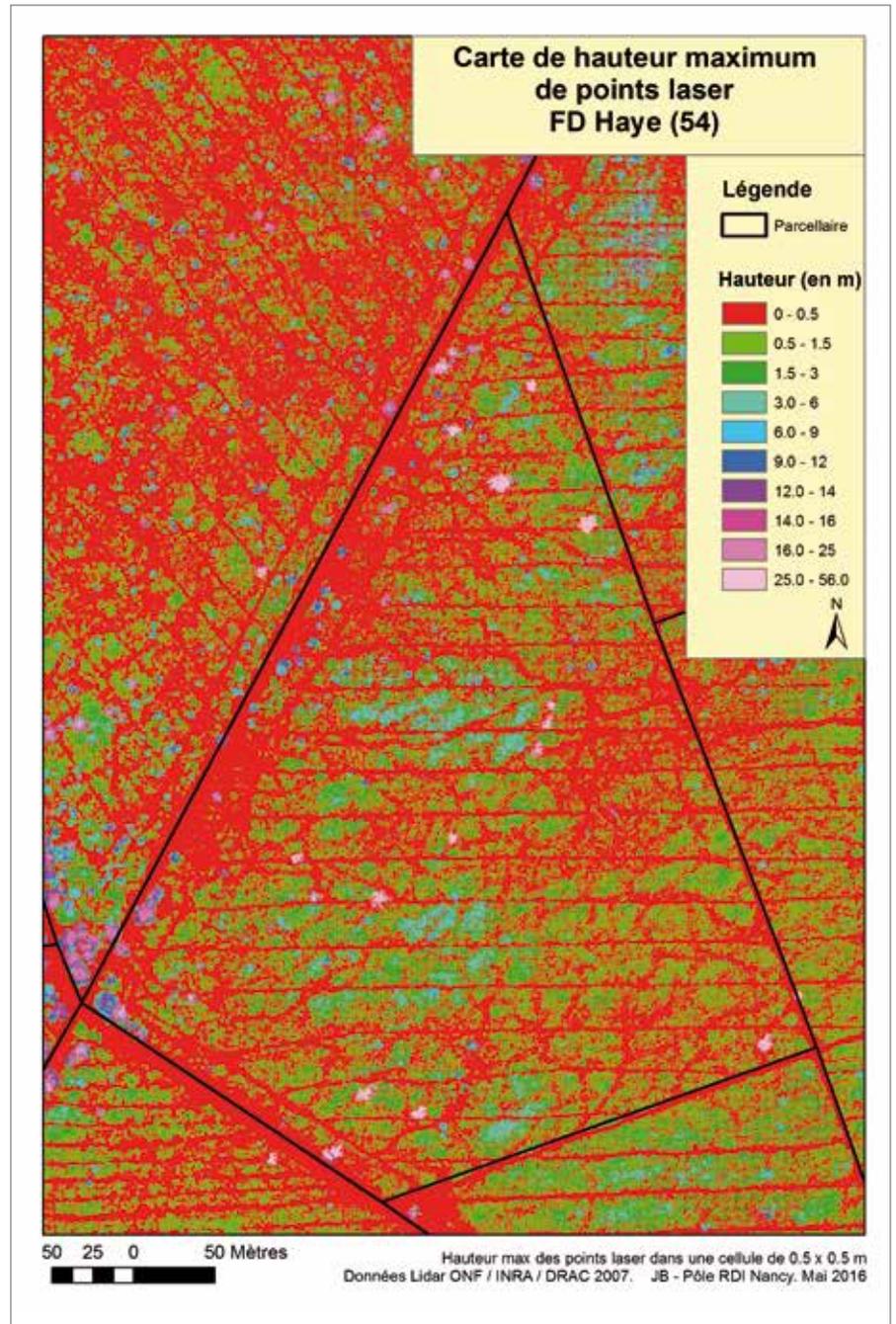


Fig. 1 : effet de la sur-circulation d'une parcelle en FD de Haye lors de l'exploitation après la tempête de 1999

Les cloisonnements d'exploitation n'ont été mis en place qu'après l'exploitation du bois d'œuvre et d'industrie : les engins ont circulé sur l'ensemble de la parcelle, traînant les grumes sans précaution particulière. Surface en rouge (hauteur de la végétation : 0-0,5 m) = 62 % de régénération non acquise en 2007, principalement à cause de l'orniérage.
Source : Jérôme Bock, ONF-RDI

2 – Caractérisation des ornières et approche vers des seuils d'alerte

Mesure de la profondeur d'une ornière

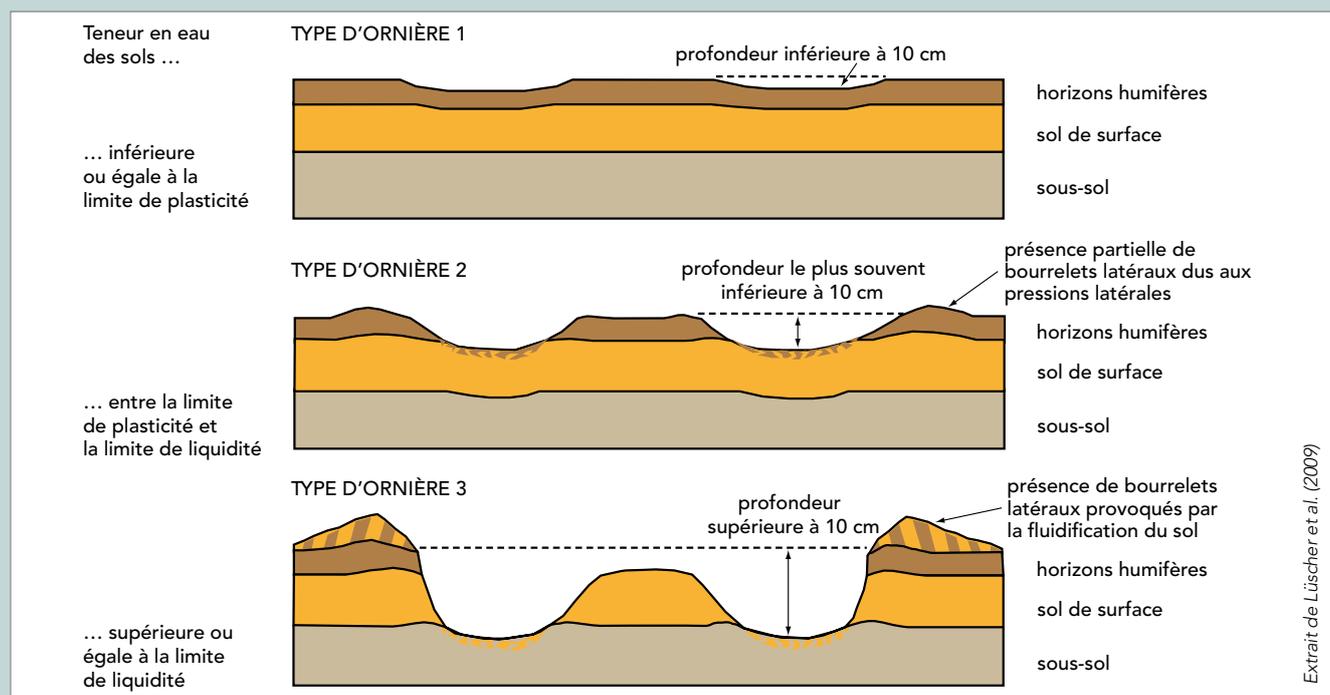
La profondeur d'une ornière se mesure entre le niveau le plus bas observé à un endroit donné et le niveau du terrain naturel. Ce niveau est à repérer à distance de l'ornière, c'est-à-dire à quelques dizaines de centimètre des bourrelets.

Définition des types d'ornières

Lüscher et al. (2009) proposent une typologie des ornières qui correspond bien à notre pratique du terrain et qu'ils présentent comme suit :

- « Le type d'ornière 1 est caractérisé par une pression exercée sur les horizons humifères, lesquels prennent la forme des empreintes de roues, et par une profondeur de l'ornière inférieure à 10 cm.
- Le type d'ornière 2 se situe dans le domaine de la déformation plastique et présente une profondeur plus importante, généralement inférieure à 10 cm atteignant l'horizon A (horizon de couleur foncée de mélange organo-minéral). Des bourrelets latéraux naissants issus des horizons supérieurs (horizons A) sont également possibles.
- Le type d'ornière 3 est défini par un ensemble de trois caractéristiques qui doivent toutes être remplies : profondeur de l'ornière le plus souvent supérieure à 10 cm, atteignant les horizons du sous-sol et présence marquée de bourrelets latéraux. À noter que le type d'ornière 3 a non seulement des répercussions plus profondes que les types 1 et 2, mais également des répercussions plus importantes latéralement. Le relevé des types d'ornière le long des cloisonnements permet de juger de la qualité du travail et, le cas échéant, de prendre les mesures qui s'imposent.

[...] Ces types d'ornière sont fondés sur les connaissances scientifiques actuelles des relations entre l'apparence extérieure d'une ornière et la fonctionnalité du sol. [Ce qui permet de donner] un critère simple pour le travail pratique en forêt [...] : les travaux devront être suspendus dès l'apparition du type d'ornière 3 ».



Vers des seuils d'alerte pour harmoniser les pratiques de terrain

En principe, l'impact des engins doit être le plus réduit possible sur toutes les voies qu'ils empruntent dans une parcelle (et aux abords). Mais en pratique, ces voies se répartissent en plusieurs types qui remplissent des fonctions différentes et ne subissent pas le même trafic.

Pour harmoniser les pratiques de terrain et éviter des disparités de jugement -arrêt ou non des chantiers dans des situations comparables-, l'analyse de la littérature permet de concevoir des critères en forme de seuils d'alerte. Sur la base des études disponibles, la **proposition de la R&D** serait la suivante :

- pour un **cloisonnement d'exploitation** (simple, dans la parcelle) : apparition des premières ornières de 15 cm de profondeur, l'idée étant de rester en-deçà sur la longueur du cloisonnement ;
- pour un **cloisonnement d'exploitation principal** (sur lequel débouchent les autres cloisonnements d'exploitation) : apparition des premières ornières de 20 cm de profondeur.

Cette proposition reste cependant à confronter à l'expérience des praticiens pour la détermination de critères opérationnels (voir le dernier article de ce dossier).



Ornières peu profondes (≤ 10 cm) tout le long du cloisonnement d'exploitation : **acceptable**



Ornières profondes (> 15 cm) tout le long du cloisonnement d'exploitation : **inacceptable**



Ornières peu profondes (≤ 10 cm) par rapport au terrain naturel, mais avec des bourrelets donnant l'impression d'ornières profondes. Huit mois plus tard (photo de droite), le cloisonnement reste praticable : **acceptable** (même si visuellement dérangeant)



Tassement et orniéragé généralisés (et il reste encore le bois bûche à sortir...) : aucune organisation de la circulation et ornières trop profondes : **inacceptable**



Ornières très larges (95 cm) et très profondes (> 20 cm) : **inacceptable**, même pour les cloisonnements principaux

E. Ulrich, ONF

Pl. 1 : exemple d'ornières de différentes profondeurs

À l'ONF, l'obligation formelle d'implanter et d'utiliser des cloisonnements d'exploitation est récente (ONF, 2009). La définition de distances maximales entre les cloisonnements prend en compte les capacités et portées des engins intervenant tout au long de la vie d'un peuplement. Les entre-axes préconisés sont entre 14 et 18 m, exceptionnellement 20 m, avec un optimum à 18 m, soit une emprise correspondant à 22,2 % de la surface parcellaire (largeur de 4 m).

Dynamique de création des ornières – observations pratiques

Les auteurs de cet article ont passé beaucoup de temps sur les chantiers d'exploitation sur sol sensible au tassement et humide, à suivre des porteurs de types et dimensions très variés pour observer l'apparition et l'évolution des impacts, et bien caractériser les phénomènes. Il faut rappeler qu'en matière d'exploitation mécanisée, nos travaux de R&D se sont concentrés principalement sur les machines de bûcheronnage et porteurs de toute taille. En ce qui concerne les débusqueurs, nous manquons encore d'éléments pour présenter des résultats consolidés. C'est également le cas des études publiées à l'étranger. C'est pourquoi les impacts liés aux débusqueurs ne seront pas traités ici.

Caractéristiques des engins suivis

Les engins à roues suivis avaient 4 à 8 roues dont la largeur variait de 500 à 940 mm, avec des charges utiles allant de 4,5 à 15 tonnes. Pour les engins sur chenilles, la largeur des chenilles variait de 600 à 1000 mm, et les poids totaux de 14 à plus de 40 tonnes. Il a été possible de suivre aussi bien des engins à chenilles rigides qu'à chenilles souples, ces dernières s'adaptant quasi parfaitement à toutes les irrégularités du terrain. Cette large gamme est donc représentative des engins circulant en forêt.

L'ensemble de ces engins présente des pressions statiques (calculées à l'arrêt) dont l'estimation s'échelonne de 150 à 1 050 g/cm² environ (engins à vide et en charge), c'est-à-dire d'un facteur 1 à 7. Les engins dont la pression au sol n'est que de 150 g/cm² sont considérés comme très vertueux. Nous nous sommes bien sûr intéressés aux situations les plus critiques, c'est-à-dire des conditions de sol argileux et proche de la saturation, voire saturé en eau. C'est dans ces situations que les avancées technologiques sont le plus attendues car, pour les conditions moins critiques, l'arsenal des solutions techniques et organisationnelles connues peut permettre d'éviter les impacts. Nous reviendrons sur cet aspect dans les articles « Étude de cas » de ce dossier (pp. 50-57).

Les porteurs classiques équipés de tracks peuvent être autorisés à pénétrer dans les cloisonnements jusqu'à un certain niveau d'humidité. L'avantage des porteurs dits plus « vertueux » doit donc pouvoir s'exprimer quand les conditions d'humidité du sol s'aggravent au-delà de ce niveau, sinon ces engins n'auraient pas d'intérêt particulier pour un entrepreneur.

Les conditions de chantier

Les observations qui suivent résultent de l'expérience pratique et non de mesures successives avec des instruments sophistiqués. Les engins observés n'ont roulé que dans des cloisonnements d'exploitation, dont la plupart ont été créés à l'occasion des chantiers test par la machine de bûcheronnage. Celle-ci a presque toujours pu travailler dans des conditions d'humidité non critiques et n'a quasiment pas laissé de traces, sinon éventuellement des marques de profils/chenilles. Il faut cependant rappeler que sur un sol humide non tassé au départ le premier passage provoque déjà les premières transformations, non visibles, des couches minérales superficielles : altération de la structure et diminution des

macropores. Il s'ensuit donc une augmentation de la densité apparente, qui réduit la capacité d'absorption et rétention d'eau et fait obstacle au transfert vers les couches inférieures du sol (stagnation d'eau au-dessus).

Tous les tests ont été réalisés dans des peuplements feuillus (chêne et hêtre), sur des sols quasi dépourvus de couche hologranique voire de rémanents. En effet, les coupes feuillues ne peuvent généralement pas fournir un paillage de rémanents d'une continuité et d'une épaisseur comparables aux coupes résineuses. La masse de rémanents est plus intéressante pour les coupes exploitées en feuille, ce qui se produit notamment dans le cas des premières éclaircies valorisées en bois énergie (sous réserve d'un prélèvement suffisant) ; mais il arrive alors, selon le système d'exploitation, que toute la biomasse soit prélevée, ce qui ne laisse rien pour le paillage malgré les dispositions de stockage temporaire sur coupe.

La formation des ornières

Dans presque tous les cas, le sol (argileux et proche de la saturation voire saturé en eau) supporte relativement bien les deux premiers passages des porteurs (planche 2) : on n'observe que les marques des profils des roues/chenilles. C'est au troisième passage (en charge ou pas) que l'on constate un changement : l'apparition d'ornières peu profondes, en lien avec une sortie d'eau venant du sol. Les deux premiers passages ont dû comprimer suffisamment le sol pour faire sortir l'eau des pores, mais ce n'est qu'au 3^{ème} passage que cette eau se libère, probablement à cause de la destruction de la structure dans les premiers centimètres du sol minéral. Dans certains cas, ces phénomènes peuvent se produire dès le premier passage. Nos observations ont permis de mettre en évidence un élément supplémentaire : les vibrations des machines. Ces vibrations peuvent varier beaucoup selon le type de suspension et d'entraînement des roues/chenilles. Elles contribuent,

Chenillard Timbear Lightlogg C, 14 tonnes à vide, 13 tonnes de charge utile, utilisée ici à 50 % maximum (total ≈ 20 tonnes) sur cloisonnement simple – sol saturé en eau



Traces après 4 passages (2 à vide et 2 chargés) : **acceptable**



Traces après 8 passages (4 à vide et 4 chargés) : **acceptable**

Porteur 8 roues HSM 208F, 16 tonnes à vide, 12 tonnes de charge utile, utilisée ici à 50 % maximum, avec pneus très larges (940 mm ; poids total ≈ 25 tonnes) – sol non saturé en eau



Traces après 4 passages (2 à vide et 2 chargés) sur cloisonnement simple : **acceptable**



Traces après 8 passages (4 à vide et 4 chargés) sur cloisonnement simple : **acceptable**



Traces après environ 60 passages sur un cloisonnement principal « incontournable » : **inacceptable**



Traces après environ 80 passages sur un cloisonnement principal « incontournable » : **inacceptable**

Photos : E. Ulrich, ONF

Pl. 2 : exemples d'ornières provoquées sur sol argileux et humide par un porteur à chenilles très souples (deux photos du haut) et un porteur 8 roues (4 photos du bas), en fonction du nombre de passages (à vide ou chargé)

notamment chez les chenillards qui se déplacent plus lentement, à « chasser » l'eau contenue dans les premiers centimètres du sol minéral. L'action conjuguée (1) de l'application répétée du poids de l'engin, (2) d'une force mécanique latérale variable exercée (via la traction) par les roues et (3) des vibrations, conduit en 2 à 4 passages à la liquéfaction progressive des couches superficielles du sol, en plus du tassement.

C'est ensuite que les ornières commencent vraiment à se former. La profondeur des ornières est fonction, à poids total égal, du nombre de passages et de la surface de contact des roues/chenilles avec le sol (planche 2).

Constat corroboré par une étude allemande

Une étude comparative a été réalisée récemment par Haas *et al.* (2014), de l'université de Freiburg (Allemagne), pour appréhender l'effet de la largeur des roues ou de l'utilisation de tracks sur la profondeur d'ornièrage, sur un sol limono-argileux de 48 à 54 % d'humidité volumique. Cette étude s'est donc placée dans la même situation extrême que celle de nos observations. L'évolution de

la réaction du sol, dans des cloisonnements nouveaux, aux passages répétés d'un porteur moyen 8 roues de 11 tonnes de charge utile (ici un HSM), a été étudiée finement après chaque passage. Ce porteur a été équipé successivement de pneus de 710 mm, de 940 mm et de pneus de 710 mm avec des tracks (Eco-Track) de 810 mm de large. Avec chaque équipement, et chargé du même lot de grumes d'épicéas (12 m³, estimé à 9 tonnes de charge), le porteur a parcouru 20 fois deux cloisonnements distincts et dédiés à chaque type d'équipement. Le poids total du porteur était selon l'équipement de 29,7 à 32,2 tonnes (pneus larges plus lourds, poids supplémentaire des tracks : 800 kg/track). Des mesures photogrammétriques (vision stéréo) ont permis de suivre très finement l'évolution après chaque passage de la profondeur, de la création des bourrelets et des déformations sur le profil total. Le résultat synthétique est présenté dans le tableau 1.

Selon la variante, la plus grande « intensité » des déformations s'observe au premier passage (940 mm), sur les 4 premiers passages (710 mm + tracks 810 mm), ou sur les 6 premiers passages (710 mm) ; les dégâts continuent

d'augmenter par la suite, mais selon une courbe plus aplatie (Haas *et al.*, 2014). La profondeur des déformations augmente inversement à la largeur des pneus/tracks. Comme le montre le tableau 1, les profondeurs critiques des ornières (> 10 cm) sont atteintes selon la variante, entre le 4^{ème} passage (pneus de 710 mm) et le 14^{ème} passage (pneus de 940 mm). Ce résultat rejoint en gros nos propres observations.

Le très bon résultat obtenu avec des pneus très larges doit cependant être nuancé par le fait que les artères principales des parcelles (cloisonnements principaux) sont parcourues, selon la taille de la parcelle, plus de 20 fois, parfois même plus de 40 fois. Dans cette situation, même les pneus les plus larges finissent par provoquer aussi des ornières inacceptables, atteignant par endroit plus de 40 cm de profondeur.

Le cas du porteur à chenilles très souples

Des observations répétées dans plusieurs chantiers nous ont permis de comprendre comment se forment les ornières dans le cas d'un porteur chenillard à chenilles très souples, qui s'adaptent facilement aux irrégularités

Nombre de passages en charge	Profondeur moyenne maximale de l'ornière (cm)	Hauteur maximale du bourrelet (cm)	Profondeur moyenne maximale de l'ornière (cm)	Hauteur maximale du bourrelet (cm)	Profondeur moyenne maximale de l'ornière (cm)	Hauteur maximale du bourrelet (cm)
	Pneus de 940 mm		Pneus de 710 mm+tracks		Pneus de 710 mm	
2	-4,1	3,1	-4,6	6,6	-7,3	7,8
4	-5,7	4,7	-7,9	10,5	-11,5	13,2
6	-6,8	5,8	-10,8	13,3	-14,7	17,1
10	-8,9	9,3	-15,1	16,2	-19,2	20,3
14	-11,2	13,0	-18,3	18,1	-22,5	21,8
20	-14,0	17,4	-21,5	20,8	-28,6	24,6

Tab. 1 : profondeurs d'ornières et hauteurs de bourrelets moyennes maximales (= moyenne des maxima observés sur 4 traces) après passage sur sol sensible humide du même porteur avec la même charge, mais avec 3 équipements de roues différents

Pneus de 940 mm, pneus de 710 mm de largeur avec tracks de 810 mm ou pneus de 710 mm seuls, sur un porteur HSM de 11 tonnes de charge utile et un poids total estimé à 29,7 à 32,2 tonnes selon l'équipement. Résultats de mesures standardisées (Haas *et al.*, 2014). Les mesures ont été réalisées sur les deux côtés des traces provoquées par le porteur avec deux répétitions par variante. En gras : dépassement d'un seuil de 10 cm de profondeur.

du terrain. Ainsi équipé, il bénéficie en quasi continu de toute sa surface potentielle de contact avec le sol. C'est sans doute ce qu'on peut faire de mieux en termes de développement pour diminuer la pression au sol, et le machinisme forestier atteint là les limites de ses possibilités dans ce domaine. Par ailleurs, ce porteur a travaillé largement en-dessous de sa charge utile (30-40 % en moins), à cause d'un important foisonnement de la charge (bois énergie feuillus). Cet engin (Timbear Lightlogg C) fait partie de ceux dont la pression au sol est la plus faible (au maximum en charge : 330 g/cm²). Et pourtant, des ornières se sont formées... Comment ?

Plusieurs éléments se cumulent : application répétée d'une pression et de vibrations au sol, faisant sortir l'eau des pores, suivie d'éjections répétées du sol liquéfié vers les côtés. À chaque passage l'ornière ne se creuse donc pas par l'action mécanique des chenilles qui déplaceraient le sol sur les côtés (ce qui serait comparable à l'action des profils des pneus), mais plutôt par éjection latérale d'un mélange très liquide « sol+eau ».

Autre différence importante : même après de nombreux passages (>10), les ornières d'un porteur chenillard à chenilles souples et larges (voire à chenilles rigides, longues et très larges) sont toujours moins profondes que celles d'un porteur sur roues, même très larges. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu tassement le long du parcours du chenillard. Ce qui nous importe ici c'est que les ornières aient une profondeur laissant les cloisonnements dans un état praticable après chaque intervention. Et il n'est simplement pas possible actuellement de faire ou d'attendre mieux.

Restauration naturelle de sols forestiers compactés et/ou orniérés

Les impacts aux sols et aux peuplements occasionnés, dès les premiers passages, par les engins d'exploitation ont conduit à limiter leur espace de circulation à des cloisonnements permanents. Cependant, la praticabilité des cloisonnements et donc l'efficacité de cette mesure peuvent être remises en cause dès lors que la circulation est intervenue dans des conditions de sensibilité accrue des sols à la dégradation physique. Dans ces conditions, les cloisonnements voient leur capacité de drainage diminuer sensiblement et restent trop humides une grande partie de l'année, compliquant les chantiers ultérieurs (Richter et Durand, RDV techniques n° 8 pp. 48-49).

Pour évaluer la sensibilité d'un sol à la dégradation suite à un/des passages d'engins il est important de ne pas oublier la dimension temporelle. En effet, la sensibilité dépend essentiellement de l'état d'humidité du sol (guide « PROSOL », Pishedda 2009) mais aussi de la persistance des effets. Si le sol des cloisonnements pouvait se restructurer naturellement en 5 à 10 ans et retrouver sa capacité de drainage optimale, on pourrait considérer la situation comme non sensible vis-à-vis de la durabilité du réseau de cloisonnements. Mais que sait-on du potentiel de restauration naturelle ?

Les processus naturels demandent du temps

En l'absence de remédiation mécanique ou chimique (par amendement), la restructuration d'un sol se réalise grâce à des processus naturels, physiques et/ou biologiques : action des cycles de gel – dégel et humectation – dessiccation (Pires *et al.*, 2008) ; activité biologique de la faune du sol et des racines essentiellement (Lister *et al.*, 2004 ; Capowiez *et al.*, 2009). Cependant, la croissance et l'activité racinaires sont fortement réduites après le passage d'engins

et peuvent mettre plusieurs dizaines d'années à revenir à des niveaux non perturbés (Wilpert et Schäffer, 2006). De même, la faune du sol peut être fortement affectée par la compaction et ne pas recoloniser ou peu les zones tassées du sol (Capowiez *et al.*, 2009 ; Bottinelli *et al.*, 2014a). De plus, si le rôle essentiel des cycles d'humectation – dessiccation dans la restructuration de sols limono-argileux a bien été mis en évidence (Werner et Werner, 2001), l'efficacité des processus physiques à restructurer les sols peut ne pas s'exprimer si le fonctionnement biologique est empêché. Par exemple, l'enracinement étant contraint par le tassement du sol, la consommation d'eau est quasiment nulle dans les horizons profonds, limitant l'amplitude des cycles d'humectation – dessiccation (Horn, 2004). De même, l'infiltration d'eau pouvant être réduite par le tassement, la ré-humectation des horizons profonds peut en être fortement affectée. Il ne faut donc pas négliger les effets à long terme du tassement du sol en profondeur dont la restauration est beaucoup plus lente que pour les horizons de surface du sol (Froehlich *et al.*, 1985 ; Goutal *et al.*, 2012).

Selon les études (type de sol, climat, impact initial, paramètres étudiés), le temps nécessaire au sol pour revenir, après tassement par une machine, à un fonctionnement non perturbé varie de une à plusieurs dizaines d'années, voire des centaines.

L'influence des types de sols...

Le type de sol influence la capacité à revenir à un état non perturbé après le passage d'engins. À impact initial équivalent, les sols les plus aptes à se restructurer naturellement sont les sols les plus riches (favorables à l'activité biologique) à texture fine (favorable aux changements de volume par humectation – dessiccation). Même pour ces sols, la restructuration nécessite au moins 10 à 20 ans (Ebeling *et al.*, 2016). Les sols acides à texture grossière ont un potentiel

très faible de restructuration : 10 à 20 ans après le passage d'engins leur restructuration n'a toujours pas démarré, ce qui fait douter de leur capacité à se restructurer au cours de la vie du peuplement (Ebeling *et al.*, 2016).

En France sur des sols limoneux à limono-argileux acides, la restauration de la capacité d'infiltration après deux passages d'un porteur en charge avec un poids total de 25 tonnes n'est toujours pas acquise 7 à 8 ans après perturbations (Ranger *et al.*, 2015). Les deux parcelles concernées (respectivement en forêts domaniales d'Azerailles et de Clermont en Argonne) diffèrent de 10 % sur la teneur en argile et d'environ 0,5 unité de pH_{eau} en surface. Le sol le plus limoneux et le plus acide a étonnamment montré une capacité à restaurer sa porosité de surface (0 à 10 cm) plus rapidement mais une capacité à restaurer sa macroporosité plus lentement que le sol le plus argileux ; ceci s'explique par une différence de structure initiale, de composants et de minéralogie des argiles (Goutal *et al.*, 2012 ; Bottinelli *et al.*, 2014b). D'autres auteurs (Brais, 2001 ; Page-Dumroese *et al.*, 2006) trouvent des résultats en contradiction avec ceux de Ebeling *et al.* (2016) : leurs études montrent que des sols à texture grossière peuvent se restaurer en 5-6 ans alors que les sols à texture fine ne sont toujours pas restaurés. Cette contradiction provient du fait que l'impact initial dépend de la densité du sol avant passage des engins. Celle-ci varie en fonction de la texture ; les sols à texture grossière, ayant en l'occurrence une densité initiale plus élevée et souvent une humidité plus faible, au moment de la circulation, que les sols à texture fine, sont moins déformables sous l'effet de contraintes mécaniques (Page-Dumroese *et al.*, 2006).

... et de l'impact initial

La capacité du sol à se restructurer dépend également de l'impact initial : plus il est important, plus le temps

nécessaire au sol pour se restructurer est long (Rab, 2004 ; Powers *et al.*, 2005 ; Page-Dumroese *et al.*, 2006). Ainsi Rab (2004) montre sur des sols lessivés australiens qu'il n'y a pas encore de restauration visible 10 ans après exploitation si l'impact initial est supérieur à 48 % de changement de densité apparente avant – après compaction. Ce type de constat reste à généraliser sur d'autres types de sol et d'autres climats. Cependant la littérature sur la restauration des sols après circulation d'engins en forêt n'est pas suffisamment foisonnante pour étudier les liens entre type de sol, impact initial, climat d'une part et vitesse et qualité de la restructuration du sol d'autre part. De plus, le paramètre principalement étudié (densité du sol) ne permet pas de conclure en terme de restauration des transferts hydriques et gazeux (Goutal, 2012 ; Ebeling *et al.*, 2016), essentielle pour restaurer la praticabilité des cloisonnements (Kremer, 2008).

Éviter l'orniérage

D'après les résultats de la littérature, on ne peut pas espérer actuellement une restauration de la praticabilité des cloisonnements en 5 à 10 ans quels que soient le type de sol et l'impact initial. Il en ressort également qu'il est encore impossible de savoir quel compromis on peut espérer pour rester dans une gamme d'impacts réversibles naturellement. Cependant, compte tenu des processus à l'œuvre, il est certain qu'on augmente les chances de restauration naturelle en évitant l'orniérage, qui crée une couche imperméable à tous transferts.

Conclusions

En l'état actuel des connaissances, il est impossible de maintenir des cloisonnements d'exploitation dans un état praticable si le tassement est trop important et si les ornières sont trop profondes. Cela incite fortement à rechercher toutes les solutions techniques et organisationnelles permettant d'éviter ces dommages. On ne peut pas non plus compter sur

la restauration naturelle entre deux interventions mécanisées pour y remédier, sinon de façon très partielle. La compréhension de la dynamique de création des ornières peut toutefois aider à trouver ces solutions organisationnelles (c'est l'objet du dernier article de ce dossier).

Sans ces dispositions préventives, les parcelles deviendront inaccessibles pour de futures opérations, à moins de rétablir artificiellement les cloisonnements dans un état suffisamment solide pour qu'ils puissent de nouveau supporter des engins lourds. Dans les deux cas il y aurait une perte financière, que ce soit par manque à gagner ou par dépense supplémentaire, sans compter toute la série des autres effets négatifs : conséquences immédiates sur les aspects paysagers et l'accueil du public, et à plus long terme sur la forêt elle-même puisque la perte des macropores réduit fortement la circulation de l'eau et des gaz dans le sol : diminution de la croissance racinaire, de la croissance des arbres, effets sur la santé des peuplements, et blocage de la régénération (Ampoorter *et al.*, 2012, Cambi *et al.*, 2015).

Erwin Ulrich

ONF, pôle RDI

Fontainebleau-Compiègne

Philippe Ruch

FCBA, pôle Approvisionnement et
1^{re} transformation

Noémie Pousse

ONF, pôle RDI Nancy

Évolutions récentes des engins forestiers d'exploitation vis-à-vis des impacts de tassement et d'orniérage

Pour satisfaire aux exigences de la gestion durable, toute intervention d'engin en forêt devrait se faire de manière que les voies empruntées restent durablement praticables par les engins. Il n'est pas acceptable, en particulier, que les engins intervenant lors d'exploitations ultérieures soient parfois contraints de quitter les cloisonnements matérialisés par le gestionnaire.

L'analyse que nous avons réalisée des différentes solutions proposées par les constructeurs de machines se veut résolument réaliste. Il est sans doute possible de développer de nouveaux engins, différents de ceux que nous allons présenter ici et qui soient capables de ne causer que de très faibles impacts sur sols sensibles et humides. Cependant ces engins ont ou auront quasiment tous un coût de revient si élevé que les revenus de la plupart des forêts productives ne permettront pas de financer les interventions.

Le réalisme nous amène donc à penser que, sauf très forte hausse du prix moyen du bois, les intervenants seront contraints à court et moyen termes de continuer à travailler avec des engins classiques d'exploitation à roues ou à chenilles : machines de bûcheronnage (dites « abatteuses ») et, pour le débardage, tracteurs forestiers, débusqueurs ou porteurs. Exceptionnellement, le recours au câble-mât est financièrement possible pour l'exploitation de bois de valeur dégageant une marge nette suffisante, sachant que cette technique coûte 2 à 3 fois plus cher qu'une

exploitation traditionnelle, ou dans des cas de chantiers sensibles à fort enjeu environnemental.

L'ensemble des essais réalisés en France ou à l'étranger avec les développements les plus « vertueux » vis-à-vis du sol nous amène à renoncer à l'illusion que le machinisme forestier pourra un jour proposer des engins à roues ou à chenilles sans impact au sol, du moins dans des conditions qui permettent aux intervenants de gagner leur vie et à toute une profession de se maintenir durablement.

Les constructeurs sont tributaires de ce réalisme. Ils n'ont pu commercialiser en nombre suffisant, pour amortir les efforts d'innovation consentis, que les engins dont le prix de vente a lui-même une chance d'être amorti par des entrepreneurs de travaux forestiers. C'est un aspect fondamental pour la réflexion sur les développements passés et à venir dans ce domaine. Certains des exemples que nous présentons évoquent ce problème de commercialisation, qui a étouffé dans l'œuf des développements prometteurs, parfois des prouesses de l'ingénierie mécanique.

L'augmentation de la masse des machines forestières : une réalité souvent mal comprise

Il y a vingt ans, on pouvait dire qu'un porteur forestier pouvait déplacer en bois sa propre masse à vide. Force est de constater que ce n'est plus le cas aujourd'hui. De multiples raisons expliquent cette situation et elles sont plus complexes qu'une simple course à la démesure ou à la productivité.

Tout d'abord, l'Europe a mis en place des réglementations pour diminuer les émissions de gaz nocifs et particules des moteurs à combustion (norme TIER, version IV aujourd'hui). Les limites imposées, identiques pour l'Europe, les États-Unis et le Japon, sont beaucoup plus exigeantes que celles d'autres régions du monde. Pour y arriver, il a fallu des filtres, des chambres de combustion et des systèmes de refroidissement plus élaborés qui ont eu un effet sur la masse des moteurs. Comme pour nos propres voitures, d'ailleurs : les moteurs des années 1980 n'ont plus grand-chose à voir avec ceux d'aujourd'hui. De plus, la qualité de l'air ambiant étant très importante pour le confort de l'opérateur, les systèmes de climatisation ont fait leur apparition il y a une quinzaine d'années.

Le temps d'utilisation potentielle des machines forestières a été multiplié par 2 voire 3 en vingt ans. Les aspects sécurité concernant les opérateurs se sont beaucoup renforcés via la « directive machine » et la normalisation : normes ROPS (structures de protection au retournement), FOPS (structures de protection contre les chutes d'objets), et TOPS (structures de protection au basculement). Ces normes impliquent forcément le renforcement des structures des cabines. Toutefois, les constructeurs ont travaillé dans le même temps sur des matériaux plus légers. En outre, pour plus d'autonomie pendant une journée de travail, la capacité des réservoirs de carburant et d'huile a été augmentée, mais là aussi les matériaux se sont allégés.

Pour un porteur, 60 % du temps de travail effectif concerne les mouvements de la grue pour le chargement et le déchargement. La portée des grues est passée de 6-7 mètres à 9 mètres parfois même un peu plus. Cela va dans le sens d'un entraxe de cloisonnement adapté à nos préoccupations. Mais ces grues entraînent plus de tensions et d'efforts sur les axes de rotation et le châssis des machines, qui sont alourdies en conséquence pour résister à ces phénomènes. Quant à l'évolution des roues (largeur et nombre) pour abaisser la pression au sol, c'est l'un des points les plus visibles de ces dernières décennies ; en contrepartie il faut nécessairement des moteurs plus puissants et des systèmes de transmission plus solides.

Le machinisme forestier évolue ainsi entre les réglementations sur la pollution, la sécurité et le confort des opérateurs ainsi que la demande de moindres impacts sur le milieu naturel, le tout en essayant de rester compétitif dans un secteur d'activité où le matériau bois a une valeur plutôt à la baisse alors que les charges de personnels sont à la hausse. L'équation est donc particulièrement complexe.

Enfin, la nécessité d'augmenter la productivité s'est également imposée avec la diminution de la valeur relative du bois par rapport à l'augmentation des coûts de revient de l'exploitation (hausse importante des prix des engins, des salaires, des frais d'entretien, des carburants, de l'huile hydraulique, des

lubrifiants...). Pour pouvoir gagner sa vie en exploitation forestière, il faut être beaucoup plus productif aujourd'hui qu'il y a 30 ou 50 ans.

Développements visant à augmenter le nombre et la largeur des roues

Cet impératif de transport de plus grandes charges a conduit les constructeurs à augmenter le nombre de roues pour ne pas accroître démesurément la pression au sol. Aujourd'hui, les statistiques des ventes montrent que 97 % des ventes de porteurs sont à 8 roues (Bonnemazou et al., 2016), contre 4 à 6 auparavant. Ensuite, afin de réduire encore l'impact au sol des machines plus lourdes, la

Type d'engin	Marque	Nombre de roues	Gamme des masses à vide, sans équipement en option (tonnes)	Gamme des charges utiles (tonnes)	Gammes des masses totales (masse à vide+charge utile) (tonnes)	Gamme de largeur des pneus (mm)
Machine de bûcheronnage	John Deere	6-8	15,05-21,7	Les machines de bûcheronnage ne se déplacent pas ou très peu lorsqu'elles bûcheronnent un arbre. Le poids maximal que la grue peut soulever est fonction du poids de l'arbre et de la distance par rapport à la machine. Il n'est donc pas possible d'indiquer un poids maximal.		600-750
	Komatsu	6	17,4-22,6			600-780
	Ponsse	6-8	17,5-24,5			673-864
	Logset	6	14,0-22,0			600-750
	Ecolog	6-8	17,0-20,5			600-710
	HSM	6-8	20,5-23,6			710-800
	Sogedep	4-8	11,0-19,0			600-710
	Sifor-Equip'Forêt	4-6	11,8-12,0			500-600
Débusqueur	John Deere	4	16,7-22,4	Les débusqueurs trainent les bois. Il n'est donc pas possible d'indiquer un poids maximal.		775-902
	Noé	4	12,2-14,8			715-775
	Camox	4	11,0-15,0			470-715
	HSM	4-6	9,3-16,8			600-866 (940)
Porteur	John Deere	8	14,7-21,1	11,0-19,0	25,7-40,1	600-700
	Komatsu	8	10,5-23,8	9,0-20,0	19,5-43,8	600-780
	Ponsse	8-10	18,4-24,2	14,0-20,0	32,4-44,2	572-673
	Logset	8	13,5-24,0	10,0-20,0	23,5-44,0	600-800
	Ecolog	8	14,0-20,3	10,0-19,5	24,0-39,8	600-800
	HSM	8	13,8-16,5	9,0-12,0	22,8-28,5	600-870 (940)
	Sogedep	8	15,5-17,6	12,0-14,0	27,5-31,6	600-710
	Sifor-Equip'Forêt	6-8	14,5-15,8	13,0	27,5-28,8	600
	Novotny	8	5,5-7,2	5,0	10,5-12,2	400-500

Tab. 1 : synthèse des gammes des machines de bûcheronnages, débusqueurs et porteurs des principales marques commercialisées en France en 2015

Masse à vide (données constructeurs, souvent hors options telles que lame avant, grappin...), charges utiles, poids totaux et largeurs des pneus.

largeur des roues a été augmentée. Il y a 40-50 ans, les tracteurs courants avaient des roues de 400 à 500 mm de large ; aujourd'hui les largeurs courantes proposées par les constructeurs se situent le plus souvent entre 600 et 800 mm pour les machines de bûcheronnage, entre 715 et 940 mm pour les débusqueurs et, pour les porteurs, entre 400 (petit porteurs) et 800 mm (et même 940 mm chez l'un des constructeurs) (tableau 1). En France, 80 % des porteurs vendus en 2015 ont une largeur de pneu comprise entre 700 et 799 mm. Les largeurs 600 à 699 mm ne représentent plus que 18 % des ventes (Bonnemazou et al., 2016). Ces deux évolutions techniques ont contribué à augmenter sensiblement les masses à vide.

La masse des machines de bûcheronnage varie aujourd'hui entre 11,0 et 24,5 tonnes. Quant à leur travail « en charge », il n'a guère d'incidence puisque la machine est alors le plus souvent à l'arrêt, même si elle bouge un peu « sur place ». Le cas des débusqueurs et débardeurs est évidemment très différent. Mais pour les débusqueurs, on ne peut indiquer que le poids à vide, entre 9,3 et 22,4 tonnes ; comme ils traînent leur charge, le poids maximal total ne peut pas être estimé aisément. C'est pourtant en charge que la pression au sol, surtout celle des roues arrière, est la plus importante, sans compter l'impact du trainage répété des grumes lourdes. Chez les porteurs, qui se déplacent aussi beaucoup sur

les cloisonnements des parcelles, à vide et en charge, il faut considérer deux poids différents : le poids à vide varie entre 5,5 et 24,2 tonnes et le poids total en charge entre 10,5 et 44,2 (tableau 1).

Cependant il ne faut pas perdre de vue que les petits porteurs peuvent provoquer le même tassement et la même profondeur d'orniérage que les grands (voir comparaison planche 1), puisqu'ils ont des roues moins larges et peuvent donc avoir le même rapport poids/surface de contact au sol. De plus, pour sortir un volume donné de bois, ils doivent faire plus d'allers-retours qu'un grand porteur, ce qui augmente leur fréquence d'impact. La réduction de

Petit porteur de 7 tonnes à vide, 5 tonnes de charge utile soit 12 tonnes de poids total en charge, avec des pneus de 500 mm de large



> 5 passages

Moyen porteur de 19,5 tonnes à vide, 12 tonnes de charge utile soit 31,5 tonnes de poids total en charge, avec des pneus de 940 mm de large



> 10 passages

Photos : E. Ulrich, ONF



Enfoncement total du petit porteur lors du premier passage sur sol saturé en eau

Pl. 1 : comparaison des impacts d'un petit porteur avec ceux d'un porteur moyen dans des conditions comparables de sols argileux et bien humides

la taille des engins n'est donc pas forcément la solution pour réduire les impacts au sol.

D'un autre côté, augmenter fortement la largeur des pneus entraîne de fortes contraintes mécaniques auxquelles les roues et axes sont soumis, surtout lorsque les engins sont en charge, et de l'élargissement des engins (au-delà de 3 m de large l'engin change de catégorie pour le transport entre deux chantiers et passe en transport exceptionnel de 2^e catégorie). Pour pallier ces contraintes, les constructeurs ont dû renforcer tous les axes, voire modifier la machine pour réduire la largeur, ce qui augmente de nouveau la masse totale.

Développements des tracks pour porteurs à roues

Pour réduire également la pression au sol, les roues d'un même bogie peuvent être entourées de tracks, c'est-à-dire de chenilles démontables et constituées de tuiles généralement métalliques de formes et de tailles diverses (voir les exemples dans la planche 2). Plus précisément, il existe deux grandes catégories de tracks : ceux à tuiles étroites ou « barrettes », conçus pour améliorer la motricité/adhérence en zone de pente, et ceux à tuiles larges dont l'objectif est d'améliorer la portance, à utiliser en plaine. Il existe aussi toute une gamme intermédiaire associant barrettes et tuiles de différentes formes pour gagner en adhérence et en portance. Seuls les tracks à tuiles larges permettent d'augmenter de façon satisfaisante la surface de contact sur sols argileux et humides. Nous ne parlerons dans la suite que de ceux-là.

Des tracks adaptés mais...

Selon des tests récents (ex. Heubaum et Padberg, 2014 et test terrain entre 2011 et 2014 par les auteurs de cet article), les plus performants sont les tracks « marais », à tuiles larges très plates et très faiblement espacées. Cependant ils ont des inconvénients. Le premier, c'est de ne pas pouvoir

être utilisés dans des parcelles de plus de 10 % de pente, car l'adhérence est si faible que les porteurs glissent. Le deuxième, c'est le poids supplémentaire : entre 800 et 1 350 kg par paire de roues sur bogie, soit 1 600 à 2 700 kg pour une machine à 6 roues (qui n'a que deux paires de roues arrière) et 3 200 à 5 400 kg pour une machine à 8 roues. Le troisième inconvénient est leur durée de vie (environ 4 à 5 000 heures machine) et leur prix : environ 12 à 16 000 € HT par paire de tracks spéciaux (soit 24 à 32 000 € pour un 8 roues), à quoi s'ajoutent le temps de montage (1 à 1,5 h/paire) et la surconsommation de gazole. Enfin, ils ne permettent généralement pas aux engins de circuler sur les routes forestières ou asphaltées car ils les abiment.

Depuis 2009, il existe des tracks en matière plastique (ex. Felasto, en polyuréthane) dont les caractéristiques sont très intéressantes (Ruch, 2015) : moyennant certaines précautions, ils n'abiment pas les routes forestières ou routes asphaltées et permettent donc de les traverser, ils ont une durée de vie importante qui dépend fortement du type de terrain (plus de 2 000 h sur terrains non caillouteux), et surtout un poids beaucoup plus faible (530 kg par paire de roues de 710 mm de largeur, soit 1 060 kg pour un porteur 6 roues et 2 120 kg pour un porteur 8 roues) ; ils font aussi moins de bruit et le remplacement des tuiles usées est simplifié (Ruch et Montagny, 2016). Mais ils sont moins performants que les tracks marais métalliques extra larges (> 90 cm) pour ce qui concerne la réduction des impacts au sol (Heubaum et Padberg, 2014), et leur prix est environ le double de celui de leurs homologues métalliques.

Un effet bénéfique certain, mais avec des limites

Les tracks augmentent considérablement la surface de contact au sol, mais la répartition du poids du porteur (en charge ou pas) n'est pas homogène sur toute la surface dessinée par les tuiles au sol (comme chez les chenillards

par exemple). Elle se fait surtout sur la partie située en-dessous et immédiatement à l'avant et à l'arrière de chaque roue. Ce phénomène s'observe aisément sur un chantier et il a été récemment bien mis en évidence, notamment par Heubaum et Padberg (2014). Les tracks ont un effet bénéfique avéré, mais la réduction des impacts n'est pas proportionnelle à la surface de contact supplémentaire.

La figure 1, extraite de Heubaum et Padberg (2014) illustre bien l'effet des différents types de tracks sur la profondeur des ornières, en fonction du poids total cumulé porté sur des cloisonnements, qui correspond aux passages du porteur à vide et en charge tels qu'on les observe en conditions réelles. Le porteur sans tracks provoque les ornières les plus profondes. L'utilisation des tracks conduit dans tous les cas à une diminution de la profondeur des ornières pour un même poids total transporté.

Le meilleur résultat s'observe avec les tracks les plus larges qui dépassent les pneus (700 mm) de 150 mm de chaque côté, ce qui donne une largeur totale de 1 020 mm (Terra-X, marque Clark tracks ; planche 3). La réduction de la profondeur est remarquable : pour un poids total supporté de 150 tonnes, ce qui correspond en gros à 5 allers-retours d'un porteur de 14 tonnes de charge utile, le poids moyen étant estimé à 30 tonnes (23 à vide, mais avec tracks, et 37 en charge), la profondeur des ornières reste inférieure à 5 cm. Pour 10 allers-retours, elle atteint tout juste 10 cm. Les tracks en matière synthétique (Felasto Pur, marque Felastec, planche 2) se classent en deuxième position, avec des ornières d'environ 13 cm après 5 allers-retours (150 tonnes).

Les tracks sont donc indéniablement un équipement très utile pour la réduction des impacts, encore faut-il, pour bénéficier pleinement de l'effet positif des tracks, les installer de façon préventive bien avant d'observer des dégâts au sol, ce qui a évidemment un coût.

Tracks à tuiles larges, adaptés pour la plaine et les sols sensibles au tassement pour améliorer la portance



Photo : D. Goetsch, ONF

Tracks marais, avec des tuiles plates.
Très bon résultat sur les sols sensibles
(sauf circulation trop répétée sur le cloisonnement).



Photo : E. Ulrich, ONF

Tracks en matière synthétique (Felasto).
Très bon résultat sur les sols sensibles
(sauf circulation trop répétée sur le cloisonnement)



Photo : D. Goetsch, ONF

Tracks à tuiles plates profilées
Résultat moyen sur les sols sensibles car les tuiles déplacent
activement plus de sol minéral que les tuiles très plates
(surtout en cas de circulation trop répétée sur le cloisonnement)



Photo : D. Goetsch, ONF

Tracks à tuiles fortement profilées
Résultats moyen sur les sols sensibles, car les tuiles déplacent
activement trop de sol minéral (surtout en cas de circulation trop
répétée sur le cloisonnement)

Tracks à barrettes étroites, adaptés pour la pente, pour améliorer l'adhérence



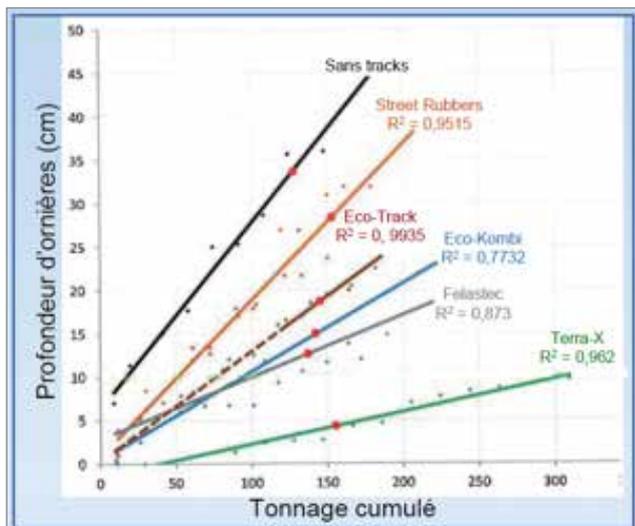
Photo : P. Ruch, FCBA



Photo : E. Ulrich, ONF

Tracks avec des tuiles trop agressives pour un travail sur sol sensible et
humide : à interdire sur ces sols

Pl. 2 : exemples de différents types de tracks et avis sur leur impact au sol



• Référence = 90 m³ débardés avec le porteur à pleine charge

Fig. 1 : profondeur des ornières en fonction du tonnage cumulé circulant sur les cloisonnements d'exploitation avec un porteur 8 roues Valmet 860.4, équipé de différents types de tracks.

Tests réalisés dans la même forêt du Land de Sachse (Allemagne) sur des sols de texture comparable (limons et argiles formant des pseudogleys à gleys) et dont l'humidité relative varie de 40 à 53 %. Source : Heubaum et Padberg (2014).



Devant : tracks ordinaires à tuiles étroites et espacées, avec crampons

Derrière : les tuiles sont plus larges (15 cm) et moins espacées (Clark)

Pl. 3 : exemple de tracks dépassant la largeur des pneus sur porteur Valmet 860.4, charge utile 14 tonnes avec des pneus de 710 mm



HSM 208 F Big Foot (11-12 tonnes de charge utile) ; pneus de 940 mm de large et tracks de 1340 mm de large ; largeur totale de 3,40 m (Source : brochure HSM_208F_Bigfoot_FR)

PONSSE 10 W
Premier porteur 10 roues tracksées
(Source : <http://www.ponsse.com/fr/produits/porteurs/10w>)

Pl. 4 : exemple de développements « extrêmes » en lien avec les tracks pour porteur à roue



Tracteur Valtra avec chenilles en caoutchouc souples (Photo : <http://trackequipement.fr/systemes-chenilles-tracteurs-valtra.php>)



Abatteuse Ecolog Soft Track 570 D (source : Encke, 2010)



Abatteuse Valmet 911.3 Snake

Photo : E. Cacot, FCBA



Abatteuse chenillard Neuson Ecotec (chenilles en métal)

Photo : E. Cacot, FCBA



Abatteuse Pro Silva (chenilles en métal)

Photo : E. Cacot, FCBA



Traces laissées par le passage d'une pelle hydraulique pour le bûcheronnage mécanisé sur sol humide (à gauche), voire très humide (à droite)

Photo : E. Ulrich, ONF

Pl. 5 : exemples de tracteurs ou machines de bûcheronnage à chenilles, développés pour diminuer le tassement et l'orniérage

Roues et tracks : jusqu'où pousser les développements ?

Deux constructeurs, HSM et PONSSE ont poussé très loin les développements pour des porteurs sur roues (solutions non testées par les auteurs).

HSM a conçu le « Big Foot », un porteur dont les roues font 940 mm de large avec des tracks qui les dépassent de 40 cm au total (répartis sur les deux côtés, planche 4). Du point de vue des contraintes physiques sur les axes des roues c'est un développement remarquable, qui conduit à un porteur dont la pression au sol est effectivement très faible en dépit d'une forte augmentation du poids total (poids des pneus plus larges + poids des tracks très larges). Avec cependant comme conséquence une augmentation du coût de l'engin et, ce qui n'est pas un détail, de sa largeur : 3,40 m au lieu de 3,0 m. Pour l'utiliser, il faut donc disposer de cloisonnements plus larges en moyenne que les 4 m qui sont la règle à l'ONF, sans compter les contraintes de transfert entre les chantiers. La législation routière limitant la largeur à 3 m, il faut obtenir une autorisation pour convoi exceptionnel de catégorie 2 ou bien s'astreindre à démonter les tracks avant transfert puis à les remonter ; dans tous les cas, il y a un coût supplémentaire qu'il faut pouvoir financer.

De son côté, suite à une diminution de la période de gel en Scandinavie, le constructeur PONSSE a misé sur l'augmentation du nombre de roues, combinée à l'utilisation des tracks : le porteur a 10 roues dont les roues avant sont réunies par deux et les roues arrière par trois dans des tracks (voir planche 4). Ce développement a les mêmes conséquences que le cas précédent sur le poids total et le coût.

Évolution vers des engins à chenilles

Développement de machines de bûcheronnage sur chenilles

Dernièrement, les tracteurs à chenilles spécifiquement développés pour l'agriculture ont inspiré les constructeurs forestiers, qui en ont étendu l'idée aux machines de bûcheronnage (planche 5). Si ingénieux soient-ils, ces développements n'ont pas conduit à des achats massifs par les entreprises de travaux forestiers, sans doute pour deux raisons principales : d'abord, l'investissement financier est très important (de l'ordre de 42000 € HT en 2010 pour chaque paire de système à chenilles dans le cas de l'Ecolog Soft Track 570 D, cf. planche 5) ; ensuite, ces machines ne peuvent pas être indifféremment employées sur tous les terrains, car le système de chenilles est plus vulnérable et moins flexible que les engins à roues sur des chantiers avec de nombreux obstacles au sol. Les constructeurs persistent à proposer ces solutions mais, dans le contexte forestier français (surtout financier), il est difficilement envisageable d'amortir ce type d'investissements.

Face à la problématique des premières éclaircies feuillues et au développement du bois énergie, les développements des 10 dernières années ont privilégié les pelles hydrauliques modifiées pour l'usage en forêt, avec des outils de coupe spécifiques à ces premières éclaircies (tête à cisaille pour la récolte d'arbres entiers). Ces engins peuvent raisonnablement travailler sur sol humide, en terrain relativement plat, mais ce ne sont pas de véritables machines de bûcheronnage ; leur domaine d'utilisation est assez restreint.

Développements de porteurs chenillards

Comme les évolutions techniques des porteurs à roues ont leurs limites, plusieurs constructeurs ont développé des porteurs « chenillards », en adaptant aux besoins forestiers les bases techniques des engins à

chenilles du BTP. Leur objectif a été de développer des porteurs de charge utile petite à moyenne (≤ 15 tonnes), pour pouvoir offrir une alternative dans la gamme des porteurs à roues la plus vendue.

Une première solution a été le développement de trains de chenilles très longs et très larges, afin d'augmenter fortement la surface des chenilles au sol. Cette solution a donné lieu à un développement particulier qui mérite d'être commenté en détail dans un article distinct (Étude de cas, pp. 50-53). Un des premiers problèmes rencontrés est la rigidité des trains de chenilles. Lorsque l'engin roule sur un terrain irrégulier ou sur des obstacles, tout le poids repose sur un ou deux points d'appui ; la pression y est maximale. Lorsqu'il n'y a que peu d'irrégularités, les trains de chenilles rigides très longs et très larges sont de vrais atouts car ils permettent alors d'étaler beaucoup plus efficacement le poids.

Une autre solution a consisté à segmenter le porteur en deux ou en trois parties dont chacune est équipée de sa propre paire de chenilles. On pouvait ainsi espérer que la surface totale des chenilles repose plus souvent au sol lors du travail dans la parcelle, pour étaler le poids. Deux développements se sont succédé : le porteur à chenilles rigides (par exemple le porteur ProSilva, planche 6) et le porteur à chenilles très souples (porteur Lightlogg C de Timbear). Du point de vue de la fréquence à laquelle le porteur bénéficie pleinement de la surface potentielle de contact avec le sol, l'avantage va au deuxième type (Löfgren *et al.*, 2010).

Évolutions concernant les débusqueurs

Les débusqueurs aussi ont connu plusieurs évolutions (planche 7). Les premiers étaient uniquement équipés de treuils. Les exigences de productivité (et ergonomie) ont d'abord

conduit à des débusqueurs à pince (ou « grapple ») : l'engin se positionne à la culée des grumes pour les saisir et les sortir sans que le conducteur ait à quitter sa cabine. Mais les impacts au sol s'en sont trouvés multipliés sur l'ensemble de la parcelle. Sont apparus ensuite des débusqueurs à grue munie d'un grappin et toujours équipés d'un treuil. Cette « petite » évolution permet à l'engin de rester sur les cloisonnements d'exploitation car la grue, d'une portée de l'ordre de 6-8 m, permet désormais d'atteindre les grumes et de les rapprocher, le treuil venant en appoint pour accéder aux grumes plus éloignées (et en secours en cas d'incident). Les

débusqueurs à câble, toujours utilisés en montagne, sont plus rares en plaine malgré leur aptitude à tirer les grumes vers le cloisonnement sans que le débusqueur lui-même ait à le quitter. À l'exception des grumes de bois d'œuvre en long, leur plus faible productivité, comparée aux autres types de débusqueurs a un impact sur le prix de revient ; l'ergonomie est également affectée, car l'opérateur doit accrocher manuellement les grumes.

L'évolution vers des débusqueurs à grue a donc été une vraie avancée et les statistiques des ventes de 2015 (Bonnemazou et al., 2016) confirment

l'augmentation de la proportion de vente de ce type de débusqueur (51 % des ventes de débusqueurs en 2014 et 2015). En même temps, les largeurs de roues ont augmenté, pour arriver, comme chez les porteurs, à des roues jusqu'à 940 mm de large (constructeur HSM), la moyenne se situant plutôt entre 710 et 800 mm. Mais ces deux évolutions, fort utiles, ne suffisent pas encore à étaler convenablement le poids des grumes trainées et la pression qu'elles exercent surtout sur les deux roues arrière. De plus, la grue elle-même ajoute quelque 1,5 à 2 tonnes au poids total. C'est ainsi que le débusqueur 6 roues est né (planche 7).



Photo : E. Cacot, FCBA

Porteur ProSilva 15-4ST
(15 tonnes de charge utile et 22 tonnes de poids à vide)



Photo : E. Ulrich, ONF

Porteur Lightlogg C de Timber
(13 tonnes de charge utile et 14 tonnes de poids à vide)



Photo : E. Ulrich, ONF

Exemples de la souplesse des chenilles du porteur Lightlogg C de Timber :
chenilles de 62 cm de large (à gauche) et de 78 cm de large (à droite)

Pl. 6 : exemples de porteurs à chenilles, développés pour diminuer le tassement et l'orniérage.

Comme pour les machines décrites précédemment, toutes ces évolutions ont conduit à l'augmentation des prix de vente, car les engins sont devenus plus sophistiqués (à elle seule, la grue induit un surcoût d'environ 70-80 k€ HT). La dernière évolution est le débusqueur 8 roues, qui commence à ressembler à un porteur transformé (Biernath, 2016).

Et les systèmes alternatifs : petite mécanisation et débusquage à cheval ?

Nous ne traitons pas ici des petits débusqueurs (éventuellement téléguidés) ni du débusquage à cheval, qui permettent de rapprocher les produits des cloisonnements d'exploitation pour qu'ils soient à la portée des porteurs ou débusqueurs. Cette façon de débusquer à courte distance peut être très utile et elle est reconnue comme vertueuse au regard des impacts au sol. Elle ne représente toutefois pas une solution technique et ergonomique raisonnablement diffusable à grande échelle. De plus, les entrepreneurs susceptibles d'assurer ce type de prestation sont très peu nombreux, ce qui ne permet pas d'asseoir une stratégie d'envergure nationale. C'est pourquoi, nous nous concentrons plutôt sur des solutions techniques pour engins classiques et des solutions organisationnelles pour les chantiers (voir les deux derniers articles de ce dossier).

Blocages observés pour le développement des engins spécifiques

Comme nous avons pu le voir, l'innovativité des constructeurs n'a pas manqué de proposer sur le marché de nombreuses et vraies améliorations techniques. L'évolution des achats de matériel témoigne d'une réelle volonté d'investir dans des machines plus « vertueuses », à l'exemple des machines à roues plus larges, avec tracks, ou des débusqueurs à grue et grappin. Mais malgré ces investissements, qui ne se font que lorsque les anciennes machines ont été amorties, il n'y a pas d'engouement pour

les meilleures solutions techniques, celles qui permettraient d'augmenter nettement le nombre de jours de travail en forêt lorsque les sols sont humides. Pourquoi ?

Sans prétendre être exhaustif, et en se basant notamment sur les commentaires des entrepreneurs présents lors des chantiers test, pendant les journées de présentation des innovations, ou à l'occasion d'échanges informels, on peut dégager plusieurs causes.

Des causes liées au problème des prototypes :

- La réticence envers des prototypes dont la résistance des matériaux/composants sur la durée d'amortissement prévue n'est pas prouvée. L'argument est recevable, car en effet seul l'usage « ordinaire » permettra de connaître la durée de vie réelle. Le problème est que si personne ne se lance, ces développements n'ont aucune chance d'aboutir ou de se perfectionner d'après les retours d'informations en conditions opérationnelles.
- La crainte que le service après-vente soit inexistant ou défaillant pour des machines qui ne sont pas abouties ou que les entreprises soient trop petites pour bien l'organiser sur le territoire français, notamment s'il s'agit de constructeurs étrangers.

Des causes liées au coût des solutions proposées :

- La peur d'un investissement qui pourrait ne pas porter ses fruits. En effet, la marge de manœuvre financière des entrepreneurs est très étroite à cause d'un écart de plus en plus faible entre coût technique de l'exploitation et prix de prestation. Ils ne peuvent donc pas se permettre de se tromper d'investissement ;
- La plus faible productivité des solutions les plus vertueuses, donc un revenu plus faible pour un coût technique plus élevé, ce qui rejoint le point précédent ;
- Le prix beaucoup plus élevé de

ces engins, sans contrepartie financière suffisante lors de l'exécution de chantiers sur sol sensible. Toutefois, à l'ONF, dans les marchés publics il est possible via la contractualisation pluriannuelle de différencier la rémunération en fonction (entre autres) des équipements pour la protection des sols (majoration des prix de base) ;

- Le manque de visibilité sur la valeur de revente des machines spéciales. En effet, le marché d'occasion n'est pas très porteur pour de telles machines.

Des causes liées à la saisonnalité de l'emploi des engins spécifiques :

- La peur de ne pas pouvoir travailler pendant des périodes plus sèches, sur sols résistants, qui favorisent les engins classiques beaucoup plus productifs que les machines spécialisées. Il serait donc nécessaire de garantir des chantiers à ces machines aussi pendant les périodes/années sèches, en acceptant l'augmentation correspondante des coûts d'exploitation ;
- L'inclination des entrepreneurs à élargir leur rayon d'action, pour avoir une réserve de chantiers sur sol moins sensible, plutôt que d'investir dans du matériel spécifique. Cette stratégie a aussi ses limites, car les entrepreneurs voient leur coût technique augmenter avec l'éloignement des chantiers ;
- La résignation à ne pas travailler une partie de l'année, plutôt que de consentir un endettement supplémentaire pour une machine dont l'emploi à temps plein est encore moins garanti que pour la machine classique. Les machines forestières sont, en effet, le plus souvent achetées à crédit et seul le travail quotidien permet de le rembourser dans un délai acceptable ;
- Un effet « oublié » très rapide dès l'arrivée de périodes/années plus sèches, qui ne conduit de fait qu'à repousser le problème d'année en année. C'est ce que nous observons depuis plusieurs années...

Débusqueurs « de base »



Débusqueur 4 roues à câble uniquement

Photo : www.elmia.se/en/forestmania



Débusqueur John Deere à pince (également muni d'un treuil en appoint)

Photo E. Cacot, FCBA

Evolutions



Débusqueur 4 roues à grue et grappin, avec Klemmbank et roues jumelées (HSM 805)

Photo : www.palfingerepsilon.com



Débusqueur 6 roues avec grue, grappin et Klemmbank (HSM 904 F)

Photo : www.technikboerse.com

Pl. 7 : évolutions des débusqueurs pour réduire l'impact au sol



Photo E. Ulrich, ONF



Photo E. Ulrich, ONF

Pl. 8 : dernière innovation de la société Ecolog (Suède, 2013) : prototype d'un porteur où tous les poids sont répartis sur deux remorques reliées (moteur, système hydraulique...), qui se déplacent de manière légèrement décalée pour étaler la pression au sol

L'ensemble de ces motifs a un effet direct et immédiat sur les petits constructeurs qui tentent de percer sur ce marché de niche (pour l'instant), celui des engins spécifiques à faible pression au sol. Les plus gros constructeurs, qui sentent une demande de plus en plus forte de leurs clients sur ces matériels, commencent eux-aussi à se positionner avec quelques solutions (cf. exemple déjà cité du 10 roues de chez Ponsse ou l'exemple de la planche 8). Mais on ne sent pas encore une vraie tendance de fond, d'où la fragilité de certains petits constructeurs qui ont misé beaucoup sur ce créneau : leurs entreprises (et leurs inventions) disparaissent car, sans ventes suffisantes, elles ne peuvent pas perdurer.

La seule exception concernerait des engins modestes (charge utile de 3 à 5 tonnes), destinés à des petits ou moyens propriétaires forestiers privés ayant une activité principale dans un autre domaine. Pour eux, l'investissement, même à un coût plus élevé, dans un engin moins impactant n'est pas une question de survie professionnelle mais un moyen de valoriser la complémentarité saisonnière de leurs activités. Mais ce modèle, qui est bien vivace dans les pays scandinaves car la forêt paysanne y occupe une place importante, est marginal en France.

Quels développements à venir en machinisme ?

Un constructeur n'investira dans l'innovation que s'il peut espérer un retour sur investissement. Les exemples que nous avons présentés permettent de comprendre que les développements les plus vertueux n'ont pas permis aux constructeurs de rencontrer le succès espéré. Indépendamment de cela, les développements de ces 15 dernières années arrivent aux limites de la technique. Qu'est-ce que le machinisme pourrait encore faire de plus ?

Il existe d'abord une liste de petites adaptations pour les engins plus vertueux déjà développés, surtout pour les rendre plus rapides, en partie plus puissants et donc plus productifs. Ensuite, le grand défi est d'optimiser la conception des engins vertueux de manière à réduire fortement leur prix de vente, pour qu'ils se situent à un niveau égal, voire inférieur à celui des machines classiques. C'est à ces conditions que les entrepreneurs pourraient accepter de les acheter.

Pour donner un exemple, l'adaptation de porte-outils existants dans d'autres domaines, et dont le coût de développement est déjà amorti, est une piste à creuser. Il existe par exemple des chenillards développés pour transporter du matériel sur la neige en Amérique du Nord (Alaska et Canada). Ces porte-outils sont puissants et rapides, avec des chenilles larges (par exemple 800 mm), souples (grâce à des galets montés sur boggies), avec des chenilles métalliques couvertes d'une épaisse couche de caoutchouc, ce qui les rend peu agressives pour le sol. Ce type de machine existe depuis longtemps et a fait la preuve de sa robustesse. Des projets sont actuellement en cours pour essayer de les adapter aux besoins forestiers.

Il existe bien sûr d'autres moyens de sortir le bois de la forêt... Le plus connu est le câble-mât. La technique existe depuis au moins 60 ans et ses atouts n'ont plus à être démontrés (Chavet, 2008 ; Pischedda (coord.), 2009). Elle est très utilisée dans tous les pays européens où la forêt est en grande partie en montagne (Allemagne (Bavière), Autriche, Italie, Slovaquie, Suisse, Tchéquie). Mais en France, elle n'a jamais réussi à se développer en ce qui concerne le nombre d'entreprises, malgré l'important effort de développement de plusieurs institutions (ex. AFOCEL/FCBA, ONF, Cemagref/Irstea). Nous savons aujourd'hui que

les freins ne sont pas techniques, au niveau de la méthode de travail. L'emploi du câble-mât en plaine est tout à fait possible et a été réalisé à maintes reprises à titre de démonstration, parfois pour de gros chantiers, dans des régions à forte proportion de sols très humides pendant de longues périodes de l'année (ex. forêts de Mormal et Bonsecours dans le Nord, Bellême dans l'Orne, Chaux en Franche-Comté et Planoise en Bourgogne). Une entreprise a débardé pendant plusieurs années autour de Sarrebourg avec un câble-mât en plaine (Ent. Jonnette). Malheureusement ces exemples n'ont pas suffi à insuffler une véritable volonté régionale d'implanter durablement cette technique en forêt de plaine ni par conséquent à atteindre un niveau d'utilisation permettant d'investir durablement dans cette technique. Le frein principal est surtout financier.

Conclusions

Au cours des 10 à 15 dernières années les constructeurs ont répondu à la demande des gestionnaires et entrepreneurs de leur fournir des machines d'exploitation forestière minimisant les impacts au sol. De nombreuses inventions et vraies solutions techniques existent. Mais ces matériels sont souvent plus chers, car ils ont nécessité de lourds investissements de la part des constructeurs. Ils sont surtout moins productifs que les engins standard et les coûts d'exploitation sont donc plus élevés. C'est le principal frein à leur utilisation. Ils nécessitent par ailleurs un effort particulier de la part des gestionnaires, qui doivent acquérir des connaissances techniques spécifiques pour promouvoir utilement leur emploi.

On peut donc comprendre que les entreprises privilégient des outils plus classiques, tout en acceptant le risque de périodes plus ou moins longues sans travail dans l'année. En plaine,

on arrive toujours à trouver une saison où on peut travailler avec ces engins classiques donc moins chers. Sauf à imaginer qu'on puisse concevoir un nouvel engin productif et dont le prix de vente soit acceptable, la solution consiste à poursuivre la recherche d'équipements additionnels plus performants pour les machines actuelles (ex. tracks plus larges).

Comme le soulignent *Cacot et al.* (2015) dans le document stratégique FCBA « Enjeux et perspectives de la mécanisation en exploitation forestière à l'horizon 2020 », la France observe une pénurie d'opérateurs depuis une dizaine d'années. L'objectif de mobiliser plus de bois à l'horizon 2020, tous types de chantiers confondus (résineux, feuillus, de la plaine jusqu'à la montagne), nécessiterait chaque année l'entrée sur le marché de l'exploitation d'environ 240 nouveaux conducteurs formés, alors que 70 diplômés seulement sortent des centres de formation. La mécanisation a profité d'abord aux chantiers sans trop de contraintes d'accès. L'augmentation de la récolte passe obligatoirement par une exploitation étendue à des terrains plus contraignants, avec des conducteurs spécialisés.

Pour faire décoller l'investissement « vertueux » (engins spécifiques et leurs conducteurs qualifiés), il serait nécessaire de faire évoluer progressivement l'offre de chantiers spécifiques en cohérence avec les procédures d'achat. Celles-ci doivent prendre en compte des systèmes de majoration pour ces chantiers particuliers.

La filière bois n'aurait-elle pas intérêt à s'engager pour des investissements permettant la continuité de l'approvisionnement même pendant de longues périodes ou années très pluvieuses ?

Erwin Ulrich

ONF, pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Dominique Goetsch

ONF, UT Sarrebourg Plaine

Philippe Ruch

Emmanuel Cacot
FCBA, pôle Approvisionnement et 1^{re} transformation

Didier Pischedda

ONF, expert national exploitation forestière et logistique



Photo E. Ulrich, ONF

Journée de démonstration du porteur HSM 208 F 11 t Big Foot, équipé avant et arrière des pneus les plus larges sur le marché : 940 mm, en FD de Languimberg, près de Sarrebourg (23 novembre 2011)

Étude de cas – Exigences d'emploi d'une machine spécialisée : le porteur chenillard « Elliator »



Photo : E. Ulrich, ONF

» Elliator a été construit par la société EMB (Bavière) et présenté la première fois en 2010 au public forestier allemand. Cette société n'est pas un constructeur connu dans le monde forestier, mais elle a entendu l'appel venant de l'Office Bavarois des Forêts (Bayrische Staatsforste) qui, en 2008-2009, a augmenté fortement son niveau d'exigence pour tous les engins travaillant dorénavant dans ses forêts. EMB a concrétisé une idée née à ce moment-là. Depuis, l'Elliator a fait le tour de l'Allemagne, il a été cité en exemple, pour la prévention des impacts au sol, dans de très nombreux articles de la presse

forestière et autres médias. Mais depuis 2013, l'entreprise propriétaire de l'unique modèle en activité cherche sans succès à le revendre. Ce n'est pas un cas unique, et son exemple peut nous permettre de mieux comprendre les raisons qui conduisent à l'échec d'innovations pourtant remarquables et réalistes pour un emploi professionnel.

Nous allons présenter les caractéristiques techniques de cette machine, avant d'en décrire les spécificités d'emploi, à la lumière des tests réalisés en 2013 en Moselle, et d'en tirer les conclusions.

Description technique de l'Elliator

L'Elliator est un des rares porteurs chenillards développés pour débarker du moyen à gros bois en contexte européen (forte exigence environnementale), avec une ambition : réduire considérablement la pression maximale au sol. Il mise pour cela sur une augmentation très forte de la surface totale de contact : les chenilles font 1000 mm de large (contre 500-600 mm habituellement pour les pelles hydrauliques issues des travaux publics) et le train de chenilles, rigide, est en contact avec le sol sur 7,10 m. Les tuiles sont très plates : elles ont été conçues avec un profil très atténué, de manière à réduire fortement l'adhérence pour ne pas creuser activement le sol. Ce porteur repose donc sur une surface totale au sol de plus de 14 m². Aucun autre porteur forestier n'atteint une telle surface !

Pour autant, la largeur totale ne dépasse pas 3 m. De plus, chaque train de chenille peut s'adapter automatiquement et indépendamment de l'autre aux variations d'inclinaison du terrain dans l'axe de l'avancement. C'est une prouesse technique pour un porteur de 34 tonnes à vide et 15 tonnes de charge utile, soit un poids total maximal potentiel de 49 tonnes. La pression au sol théorique maximale est donc de 350 g/cm², à comparer aux pressions des porteurs classiques, qui dépassent souvent 1000 g/cm². Cependant le poids à vide important induit des coûts de transfert élevés entre chantiers (porteur puissant, convoi exceptionnel de catégorie 1).

Ce porteur fonctionne de surcroît avec un moteur remarquablement peu bruyant de 136 chevaux. Il peut être équipé soit de ranchers, soit d'une pince à grume (Klemmbank), et surtout il est muni d'une grue très puissante d'une portée de 10 m, capable de soulever à 10 m des grumes de 2 tonnes.

L'ingéniosité ne s'arrête pas là. Pour rapprocher les grumes hors de portée de sa grue, l'engin dispose aussi d'un treuil dont le câble, de 8,5 tonnes de force de traction, sort du corps de la grue à environ 3,5 m de hauteur. Cela permet de réaliser le débusquage en soulevant les grumes, ce qui limite le scalpage du sol, inconvénient typique des débusqueurs à treuil. Toutes les fonctionnalités nécessaires au chargement/débusquage peuvent aussi être télécommandées, lorsque le chauffeur doit quitter sa cabine.

Enseignements des tests de chantier : spécificités d'emploi de l'Elliator

Ce porteur a été testé pendant 4 semaines en France (région de Sarrebourg). Ces tests nous ont permis d'analyser les conditions optimales d'utilisation, celles qui permettent d'optimiser ses avantages.

La forte réduction des impacts au sol par rapport aux engins classiques est bien visible (pas de création d'ornières, voire aplatissement d'anciennes ornières, ce qui rend le cloisonnement de nouveau praticable) et répond pleinement à l'objectif que s'est fixé l'inventeur. À ceci près toutefois que, lorsque le terrain n'est pas parfaitement plat, le contact au sol se réduit à une faible proportion de la surface potentielle (voir planche 1), où la pression est maximale, sans forcément créer d'ornière.

Conditions d'emploi de l'Elliator : un prévisionnel et une planification rigoureuse des chantiers

Premièrement, il faut être conscient qu'il s'agit d'une machine spécialement conçue pour terrain humide et peu portant, sortant donc du champ ordinaire d'emploi des porteurs classiques. L'Elliator est d'ailleurs bien plus cher qu'un porteur classique : 400 à 500 000 € HT environ selon les options, contre 270-300 000 € HT pour un porteur à roues de même charge utile.

Le prix de prestation est donc plus élevé qu'avec un porteur classique. Deuxièmement, ce porteur se déplace plus lentement qu'un porteur sur roues. De ce fait, la productivité moyenne, tous produits confondus, est faible, de l'ordre de 8 m³/heure ; le prix de prestation au m³ est par conséquent de l'ordre de 24 €/m³.

Pour pouvoir amortir cette machine en 5-7 ans (durée classique pour les engins forestiers), il faut lui fournir plus de 200 jours de travail par an. Mais même à ces conditions, le coût technique horaire est élevé ; il faut donc une organisation annuelle des chantiers infaillible, qui puisse lui garantir le plein emploi. Potentiellement, la capacité annuelle du porteur se situerait entre 12 et 16 000 m³. Compte tenu des imprévus qui, du côté du gestionnaire, peuvent empêcher le démarrage de tel ou tel chantier, le mieux est donc de « gonfler » un peu le portefeuille annuel de chantiers, en ciblant environ 20 000 m³/an. La planification des chantiers doit être faite de manière à éviter absolument les temps d'attente entre deux chantiers, sauf temps nécessaires à l'entretien et aux réparations, et à limiter les transferts d'un chantier à l'autre. En particulier, on doit chercher à ne faire que 3 à 4 gros transferts de la machine, car ces transferts sont coûteux et demandent du temps. Il serait donc possible de prévoir de l'ordre de 5 000 à plus de 6 000 m³ par grand massif.

Vu du côté ONF, ce porteur pourrait donc intervenir soit dans les forêts gérées par une seule agence, soit sur le territoire de plusieurs agences, à condition de pouvoir mutualiser la planification entre services. Ceci est possible via le lotissement des marchés publics d'exploitation forestière.



Débardage de très gros bois de valeur



Débusquage de grumes en toute longueur avec le Klemmbank



Rapprochement de grumes très lourdes et hors portée de la grue de 10 m, avec un câble sortant à environ 3,50 m du corps de la grue (force de traction : 8,5 tonnes)



La cabine peut être surélevée pour une meilleure visibilité



(Photo : www.elliator.com)

Chaque train de chenille peut s'adapter automatiquement et indépendamment de l'autre aux variations d'inclinaison du terrain dans le sens de l'avancement



Lorsque le terrain n'est pas parfaitement plat, tout le poids porte sur une surface de contact réduite ; la pression au sol y est concentrée, sans forcément créer d'ornière



Traces après 4 allers-retours : de l'eau sort du sol, du fait du tassement et des vibrations, mais le cloisonnement reste 100 % praticable.



Passage sur des cloisonnements saturés en eau, en laissant intactes même les ornières profondes provoquées 4 ans plus tôt par un débusqueur...

Photo : E. Ulrich, ONF

Pl. 1 : exemples de différents types d'emplois du porteur Elliator (société EMB) et de son impact au sol

Conditions d'emploi de l'Elliator : des exigences précises envers les chantiers

La machine fait 3 m de large et elle a besoin de cloisonnements de 4 m de large. L'entrée dans les cloisonnements doit pouvoir se faire en arrondi, car un chenillard (surtout de cette longueur) ne peut pas tourner facilement. L'entrée dans des cloisonnements à 90 degrés est possible, mais elle exige des manœuvres qui demandent du temps. Le travail est optimisé lorsque l'entre-axe des cloisonnements d'exploitation est de 18-20 m (cf. portée de la grue), mais le câble intégré permet de faire du débusquage sur au moins 40 m (cependant le débusquage diminue la productivité...).

Les cloisonnements d'exploitation doivent être le plus droits possible, sans souches au milieu, sinon la machine doit multiplier les manœuvres de changement de direction, occasionnant scalpages du sol et pertes de temps, alors que ses déplacements sont déjà très lents. De plus, le terrain doit être plat car les tuiles ont une faible adhérence et l'engin peut donc facilement glisser, notamment si le cloisonnement est en dévers. Par contre, de faibles pentes peuvent être acceptées dans la direction de l'axe des cloisonnements.

Recommandations pour l'organisation au sein des chantiers

Vu sa faible vitesse de déplacement (< 6 km/h) et le temps nécessaire pour prendre les tournants, ce porteur spécialisé n'est pleinement efficace que s'il reste sur les cloisonnements d'exploitation, sans parcourir de longue distance jusqu'à une place de dépôt. Inversement, un débusqueur est beaucoup moins cher au m³, mais ne peut pas accéder à une parcelle sur sol humide. De ce constat peut naître une complémentarité, à réfléchir pour chaque chantier. Il

faut se demander, selon la taille des parcelles et la disposition des places de dépôts, si l'emploi d'un débusqueur en appui serait judicieux, pour procéder comme suit : (1) l'Elliator ne circule que sur les cloisonnements et décharge les produits à la sortie de chaque cloisonnement, sans faire de tri ; (2) le débusqueur reprend les produits, les trie éventuellement et les achemine sur la place de dépôt. Une première expérience en FD de Fénétrange (près de Sarrebourg) donne les prix de prestation externe suivants : 10-16 €/m³ pour le bûcheronnage manuel et le façonnage ; 24 €/m³ pour le débardage avec l'Elliator ; 4-5 €/m³ pour le tri et transport vers la place de dépôt avec le débusqueur. La fourchette de prix pour la prestation totale est donc de 38 à 45 € HT/m³, contre un prix habituel de 9-15 € HT/m³ ; la différence est très importante.

Cette approche, qui rejoint celle du propriétaire de la machine, limiterait son emploi aux gros bois de valeur, dont le prix de vente permet de compenser le coût du débardage, ce qui réduit le nombre potentiel de chantiers par massif.

Conclusions sur l'utilisation

L'Elliator apporte de vraies solutions techniques pour la prévention des impacts de l'exploitation sur sols sensibles. Mais pour encourager un entrepreneur à en faire l'acquisition, il faudrait pouvoir lui garantir contractuellement du travail pendant au moins 5 ans (période minimale d'amortissement), en lui garantissant du travail aussi pendant les périodes sèches.

Lorsque nous avons présenté cette approche à différents gestionnaires de la moitié nord de la France, force a été de constater que la gestion courante n'est pas encore organisée pour pouvoir garantir de telles prévisions de chantiers. Il faudrait pour

cela mettre en place une organisation et un planning spécifiques, dédiés à l'emploi de cette machine spéciale. L'impact financier est également un vrai frein et il faudrait trouver le moyen de le faire partager par toute la filière.

Cet exemple montre concrètement que l'emploi de machines spéciales, quel qu'en soit le type (machine de bûcheronnage, porteur, câble-mât, câble long...), ne peut se faire sans implication active du gestionnaire pour garantir à un entrepreneur qui accepte de se lancer des conditions normales d'activité. Le gestionnaire doit en outre être bien formé aux techniques en question, afin de contribuer à la fluidité du déroulement de chaque chantier.

Erwin Ulrich

ONF, pôle de

Fontainebleau-Compiègne

Dominique Goetsch

ONF, UT Sarrebourg Plaine

Didier Pischedda

ONF, expert national exploitation forestière et logistique

Étude de cas – Exigences d'emploi d'une machine spécialisée : le chenillard combi « Lightlogg C »



Photo : E. Ulrich, ONF

Le Lightlogg C est une machine combinée d'exploitation et débardage, conçue pour minimiser les impacts au sol. Il a été construit par la société suédoise Timbear et présenté pour la première fois en 2009 au public à la plus grande foire forestière au monde : « Elmiawood » (Suède). La société Timbear a été créée spécifiquement pour la conception, la construction et la vente de cette machine, par un consortium de 3 partenaires : le propriétaire de la société Engcon

(outillage pour engins de travaux publics), à hauteur de 75 % du capital, et deux autres personnes détenant chacune 12,5 % des parts.

Les concepteurs de la machine ont mis sur les besoins de la Scandinavie en machines à faible pression au sol. Besoins que les gestionnaires et entrepreneurs de travaux forestiers ont fortement éprouvés après de nombreuses années sans gel prolongé en Scandinavie. Cette région recèle en effet les plus grands stocks

de bois et volumes par hectare, mais les forêts y poussent sur des sols très humides, gorgés d'eau parfois jusqu'à la surface, voire sur des tourbières. Les engins traditionnels sur roue, même tracksés, sont de plus en plus souvent en difficulté sur sol non gelé : soit ils provoquent de profondes ornières, soit ils s'enfoncent dans les tourbières et doivent faire appel à d'autres engins pour s'extraire. Il en résulte des impacts intolérables ou des pertes de production pendant les périodes de chômage technique forcé.

L'idée est donc née de développer une machine à très faible pression au sol, servant à la fois pour le bûcheronnage et pour le débardage, moyennant un temps assez court de transformation de l'engin pour passer d'un usage à l'autre : une machine « combi » (ce type de machine existe par ailleurs pour des engins sur roue).

Mais après avoir produit et vendu 17 machines, la société Timbear a déposé le bilan en mars 2014 (Gabriel, 2014), 5 années seulement après sa création, faute d'avoir atteint son objectif de vente de 20-30 machines par an. Quelles en sont les causes ? Voyons d'abord les caractéristiques de la machine, que nous décrivons uniquement dans sa version porteur, au cœur de nos réflexions sur le tassement et l'orniérage.

Les caractéristiques techniques du Lightlogg C

Le Lightlogg C est à ce jour le seul chenillard forestier à chenilles souples qui ait été développé pour transporter une charge utile de 13 tonnes. Il se situe donc dans la gamme moyenne des porteurs utilisés en Europe. Les autres porteurs à chenilles souples développés ces dernières années ont quasiment tous une faible charge utile, 5 tonnes maximum. Timbear a donc voulu entrer en concurrence avec les porteurs sur roues les plus répandus.

Le concept consiste à répartir les charges sur 3 unités indépendantes : la partie abritant le moteur et toutes les connexions hydrauliques et électriques, avec au-dessus la cabine du chauffeur (planche 1, photos a, b et c), puis une première remorque pouvant transporter 6 tonnes de charge utile et une deuxième remorque qui peut porter au maximum 7 tonnes. Les trois parties sont alimentées en hydrostatique intégrale. Chaque partie dispose de 2 bogies à 3 roues métalliques caoutchoutées sur le pourtour extérieur (photos e et f). Chaque bogie dispose de son propre moteur qui alimente 2 des 3 roues.

L'ordinateur de bord gère la puissance de chaque moteur en fonction du terrain et évite ainsi que les roues tournent plus vite que nécessaire et donc que le sol soit creusé et la machine s'embourbe.

Les 3 roues sont entourées (comme avec des tracks) par des chenilles d'un type particulier qui sont une adaptation des bandes transporteuses (\approx tapis roulants) utilisées dans les mines et carrières : bandes qui ont une très forte résistance au déchirement tout en restant très souples. Sur ces bandes sont vissées des tuiles, ou barres, de 62 cm de long initialement (photos c et e) et qui ont été augmentées en 2012 à 78 cm (photo d) pour améliorer encore la portance. Ainsi, la pression théorique et statique au sol en charge maximale serait de 270 g/cm² seulement. C'est, en effet, la plus faible pression statique au sol pour un porteur de cette gamme. La souplesse des bandes conduit à ce qu'elles épousent en continu les irrégularités du sol (photos c, d et e) et permettent ainsi à l'engin de profiter pleinement de la surface potentielle de contact des chenilles.

C'est un atout important lorsqu'on vise à réduire la pression au sol. Ce porteur se déplace effectivement en pleine charge sur les tourbières sans s'enfoncer, ce qui prouve que le calcul du dimensionnement de la surface totale de contact est correct.

De plus, la combinaison des bogies à 2 roues solidaires motorisées plus une troisième et des bandes chenillées confère à cette machine une très grande souplesse : même si tous les bogies sont orientés différemment dans l'axe d'avancement, la machine avance sans problème malgré sa longueur totale de 11,5 à 13,5 m (photos c et d). La variation de 2 m sur la longueur vient de ce que la deuxième remorque peut s'étirer grâce à un vérin intégré à son axe principal (photo g et h) et qui peut être commandé depuis la cabine. Cela permet de transporter 2 types de produits de longueur différente (4 m et 5 ou 6 m).

Le moteur de 130 chevaux est un peu trop faible pour alimenter à la fois les 6 bogies et la grue. De ce fait, les déplacements/mouvements sont moins rapides que ceux des porteurs



Photo : E. Ulrich, ONF

Fig. 1 : état du cloisonnement d'exploitation après 4 aller-retours (à vide et en charge), soit 8 passages du porteur Lightlogg C sur sol humide. La profondeur des ornières est en moyenne inférieure à 5 cm (hors bourrelets).



a

Photo : E. Ulrich, ONF

Le Lightlogg C est conçu pour des produits façonnés courts (4-5 m)...



b

Photo : E. Ulrich, ONF

... et ne convient pas aux produits longs, qui bloquent l'articulation entre les deux remorques



c

Photo : E. Cacot, FCBA

Les parties du porteur s'adaptent de manière indépendante aux irrégularité du sol : ici avec des chenilles de 62 cm de large...



d

Photo : E. Ulrich, ONF

... ou là avec des chenilles de 78 cm de large.



e

Photo : E. Ulrich, ONF

Ensemble de 3 roues, dont un bogie à 2 roues solidaires motorisées ; 3^e roue indépendante dans la mobilité verticale



f

Photo : E. Ulrich, ONF

Détail de la roue en fer, caoutchoutée sur le pourtour



g

Photo : E. Cacot, FCBA

Deuxième remorque : en mode rabattu, elle transporte le même produit que la première (longueur 4 mètres)...



h

Photo : E. Cacot, FCBA

... en mode rallongé, elle peut transporter un autre produit, plus long (5 ou 6 mètres)

Pl. 1 : différentes situations de débardage et de franchissement du Lightlogg C en Suède et lors des chantiers test réalisés en France en 2011 et 2014

plus classiques et la grue manque de force. Ce sont les seuls points vraiment faibles de cette machine. Enfin la largeur de l'engin ne dépasse pas 2,50 m avec les chenilles de 78 cm de large, ce qui est plutôt un atout car il peut circuler et manœuvrer dans des cloisonnements assez étroits sans aucun problème.

Résultat : une vraie différence au niveau de la profondeur d'orniérage

Comme indiqué dans le premier article de ce dossier (pages 28-36), le Lightlogg C crée des ornières moins profondes que ses concurrents sur roues, même tracksées, et laisse les cloisonnements dans un état praticable (figure 1), malgré la liquéfaction superficielle du sol engendrée par les vibrations des moteurs des bogies. Le constructeur a donc gagné son pari sur la question de l'impact de la machine sur les sols.

Quelques raisons de l'échec commercial de cette machine

Contrairement à l'Elliator qui nécessite une planification spéciale des chantiers, le Lightlogg C peut travailler comme un porteur classique. Il est maniable, s'adapte parfaitement au cheminement sinueux des cloisonnements et aux irrégularités ou obstacles au sol.

Cette machine a tourné en Suède, Lituanie, Estonie, Russie et en France. En France nous avons pu la faire venir à deux périodes différentes, et la tester dans des circonstances très contrastées : d'une part, de très bonnes conditions de sols pratiquement secs, ce qui a permis de connaître sa productivité maximale avec des billons de 4 m ; d'autre part des conditions extrêmement mauvaises, sur sols gorgés d'eau et de surcroît avec des produits inadaptés à cette machine (arbres entiers de première éclaircie, avec des longueur de 9-13 m).

Nous avons donc pu noter les éléments suivants :

- L'engin est bien plus lent lors des déplacements (à vide et en charge) que les porteurs classiques ; sa productivité est donc bien plus faible, ce qui en donne une image défavorable auprès des opérateurs ;
- Sa grue manque de force, ce qui se traduit aussi bien par une certaine lenteur de mouvement que par l'incapacité à lever de pleins grappins d'arbres entiers (lors de première éclaircies, par exemple), d'où l'obligation pour le conducteur de lâcher des produits et multiplier les reprises (photo b de la planche 1 : le grappin n'est pas rempli, à comparer avec la photo a, où le grappin est plein) ;
- Les paniers (ranchers) sont conçus pour des produits façonnés, d'une longueur variant de 4 à 6 m maximum. Le Lightlogg C est donc parfaitement adapté au marché scandinave ou de l'Europe centrale, mais pas au marché français qui exige potentiellement de tous les porteurs une très grande souplesse dans l'aptitude à débarder des produits différents d'un chantier à l'autre, avec des longueurs de 4 à 13 mètres... Les essais du Lightlogg C pour du bois énergie issu de premières éclaircies feuillues (longueur : 9-13 m) l'ont vite montré : bloquées par les produits, les deux remorques ne peuvent plus s'articuler lorsque le porteur doit prendre des tournants un peu serrés (photo b) ;
- À cela s'ajoute le prix du Lightlogg C. En version porteur uniquement, il a coûté, selon les options, entre 300 et 319 k€ HT contre 250 à 280 k€ pour un porteur classique de la même gamme. Les entrepreneurs en espèrent évidemment une meilleure productivité pour amortir le surcoût, mais c'est l'inverse qui se produit...
- Lors des périodes sèches, ce porteur ne soutient pas la comparaison avec des porteurs classiques

au niveau de la productivité, ce qui obligerait les entrepreneurs à trouver toute l'année des chantiers « humides », afin de lui enlever la concurrence des porteurs classiques. Là encore, la gestion forestière n'est pas assez bien organisée pour offrir en continu ce type de chantier à une machine particulière.

Ce problème de productivité aurait été gommé ou atténué si le constructeur avait pu faire les modifications qu'il envisageait en réponse aux deux premiers points : augmenter la puissance du moteur et mettre une pompe hydraulique supplémentaire. Mais faute de commandes, il a dû arrêter la production.

Conclusions

Le Lightlogg C et l'Elliator (cf. article précédent) ne sont pas les seules machines spéciales en situation d'échec. D'autres les ont précédées et d'autres suivront. Les acheteurs potentiels, le plus souvent des entrepreneurs de travaux forestiers, ont très vite fait le tour des éléments les plus sensibles que nous avons évoqués. Dans un marché de travaux forestiers très tendu depuis des années, ils ne disposent plus d'une marge de manœuvre financière suffisante pour se lancer dans des expérimentations techniques.

C'est donc là encore le frein financier qui bloque une évolution vertueuse et qui a conduit à la fin prématurée d'une jeune entreprise, pourtant promise à un bel avenir...

Erwin Ulrich

ONF, pôle RDI de
Fontainebleau-Compiègne

Dominique Goetsch

ONF, UT Sarrebourg Plaine

Didier Pischedda

ONF, expert national exploitation
forestière et logistique

Influence de l'organisation des cloisonnements sur la circulation et les tonnages supportés au cours de la vie d'un peuplement de plaine – Approche théorique

Il est désormais bien admis que, pour préserver les sols, il faut limiter la circulation des engins aux seuls cloisonnements d'exploitation. Toutefois, quelle est en zone de plaine l'orientation optimale de ces cloisonnements et quelles sont ses conséquences sur la protection du sol et la productivité du débardage ?

L'implantation des cloisonnements d'exploitation nécessite une réflexion organisationnelle active et préventive au niveau de chaque parcelle, voire sur une surface forestière plus conséquente comme par exemple un ensemble de parcelles contiguës. Cette réflexion a des conséquences pour toute la vie du peuplement. Elle doit être menée en amont et la décision ne doit pas être prise sous la pression d'un début de chantier imminent.

Pour illustrer cette réflexion et apporter quelques éléments de réponses, nous présentons ici les résultats issus d'une étude conduite dans le cadre du projet européen SIMWOOD¹, dont l'objectif est de promouvoir la mobilisation du bois dans l'Union Européenne. L'étude simule les diverses modalités d'implantation des cloisonnements et organisation des exploitations dans une parcelle rectangulaire de feuillus, une chênaie à sous-étage de charme, et sur terrain plat : parcelle de 8,7 ha dans le Bois de Ferrières (dans l'Aube).

Rappel sur le cloisonnement optimal

La finalité des cloisonnements d'exploitation est de constituer à l'intérieur d'une parcelle un réseau de voies de circulation pour préserver la surface boisée. En effet, la compaction liée à la circulation des engins a des conséquences néfastes sur le fonctionnement biologique du sol et par conséquent sur la productivité du peuplement, la régénération, l'état sanitaire et la biodiversité (Pischedda (coord.), 2009). Sans cloisonnement, la parcelle peut être parcourue sur 30 à 60 % de sa surface au cours d'une seule coupe (surface calculée sur base de l'empattement de la machine) (Lewin et Puech, 2004). La surface totale parcourue après plusieurs coupes, tout au long de la vie d'un peuplement, peut ainsi dépasser de beaucoup les 60 %. De plus, lorsque les conditions sont défavorables, l'essentiel des dégâts (60 à 80 % de l'impact de compaction) survient lors du premier passage (Pischedda (coord.), 2009).

Compte tenu des dimensions des machines d'exploitation forestière, le cloisonnement optimal présente les caractéristiques suivantes : **largeur de 4 m** (la largeur d'une machine étant de 2,5 m à 3 m), **espacement de 18 m** (la portée moyenne d'une grue étant de 9 m), **tracé le plus rectiligne possible**, dans le sens de la pente (même les pentes légères

des plaines...) et en oblique sur les sorties pour faciliter les manœuvres (voir encadré). Certains paramètres sont à adapter aux contraintes du terrain comme par exemple la prise en compte d'un cours d'eau, d'une zone humide ou d'une rupture de pente ainsi que des voies de circulation existantes. Indépendamment des contraintes internes à la parcelle et au chantier d'exploitation, **l'implantation des cloisonnements est conditionnée par les infrastructures d'accès à la parcelle et l'emplacement des places de dépôt** (Fiche technique ONF – Sol n° 7, Mourey et al., 2012).

Quel est l'impact de l'orientation du cloisonnement sur la surface circulée ?

À contraintes égales, la figure 1 illustre sur notre cas d'étude l'impact théorique de l'orientation des cloisonnements sur la surface totale circulée, et par conséquent sur la surface totale boisée qui n'est pas impactée par la circulation.

Il ressort de la comparaison des orientations longitudinale, transversale et oblique qu'il n'y a pas de différence très significative en termes de surface de cloisonnement (environ 20 % de la surface totale). L'espacement de 18 m permet aux engins de rester sur les cloisonnements et de couvrir

¹ Le projet SIMWOOD est financé par le 7^{ème} Programme Cadre de l'Union Européenne pour la Recherche et le Développement technologique (PCRD), convention n° 613762

toute la surface des bandes boisées grâce à la portée du bras des engins (0 % de surface inaccessible, pour les trois orientations).

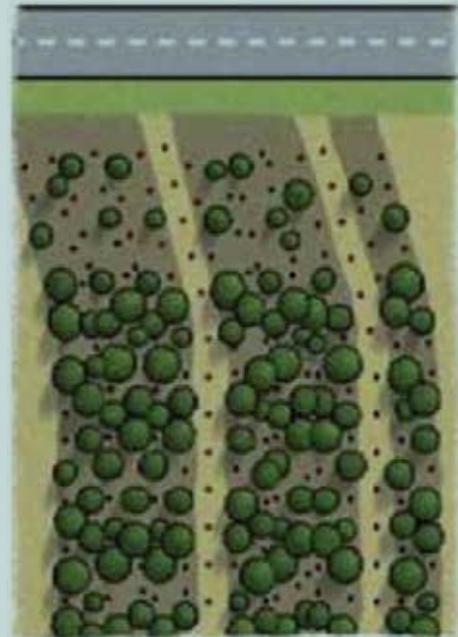
Par contre, il y a évidemment une nette différence de longueur moyenne des cloisonnements : 437 m en orientation longitudinale contre 195 m en transversale et 189 m en oblique. Quant à la longueur totale cumulée, c'est pour l'orientation longitudinale qu'elle est la plus faible (4 365 m) et elle n'augmente que de +7 % et +8 % respectivement pour les orientations transversale et oblique.

Ces résultats sont généralisables à toute parcelle rectangulaire.

Zoom sur les sorties de cloisonnement

La sortie des cloisonnements doit être orientée en biais pour faciliter le débardage et éviter de blesser les arbres de bordure. Ceci est particulièrement vrai lorsque les cloisonnements ne débouchent que sur un cloisonnement principal. S'ils débouchent sur la place de dépôt, l'angle doit tenir compte de la largeur disponible pour manœuvrer.

Par souci de simplification, l'orientation en biais des extrémités de cloisonnement n'est pas représentée dans les schémas de nos simulations.



Un cloisonnement courbé à la sortie

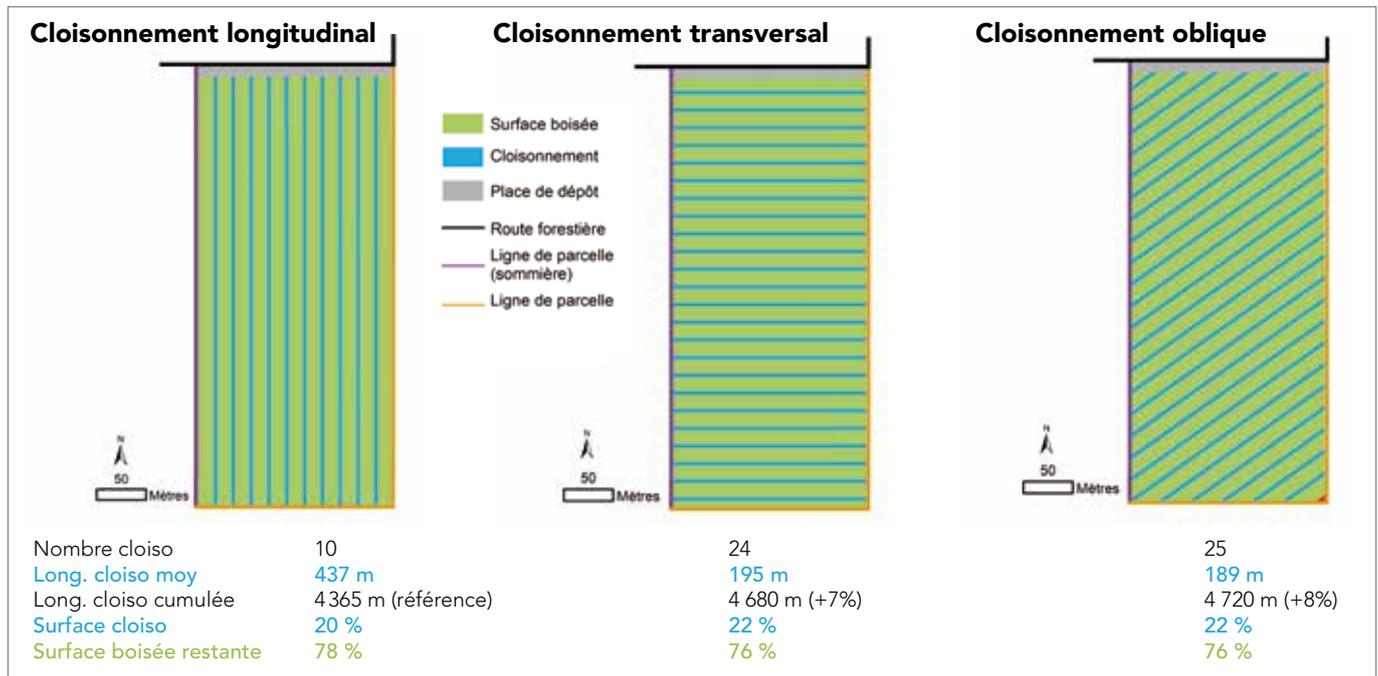


Fig. 1 : impact de l'orientation du cloisonnement sur la surface boisée, illustré sur notre cas d'étude : une parcelle du Bois de Ferrières (10)

Surface de la parcelle : 87 178 m² ; entre-axes de tous les cloisonnements = 18 m ; surface de la place de dépôts = 2 % de la surface de la parcelle ; surface inaccessible aux engins = 0 % partout.

Quel est le système de cloisonnement le plus efficace pour le débardage ?

Pour illustrer la question du système de cloisonnement le plus efficace, nous nous sommes placés au stade de la coupe définitive, après que les grumes ont été sorties au débusqueur. La simulation s'applique uniquement au prélèvement de 80 m³/ha de la récolte de bois énergie liée aux houppiers. Les cloisonnements ont une largeur de 4 m et sont espacés de 18 m. Pour simplifier les calculs, les déchargements sont effectués sur un seul point au centre de la place de dépôt.

Les paramètres de débardage utilisés sont synthétisés dans le tableau 1. L'hypothèse adoptée pour les calculs qui suivent est que la parcelle ne présente aucun autre problème que la sensibilité du sol.

Nous avons comparé sept organisations de débardage (figure 2, scénarios ① à ⑦), sur base de la distance parcourue et du temps de débardage et selon la combinaison de quatre modalités :

- le nombre de places de dépôt : 1 place de dépôt ou 2 places de dépôt ;
- l'orientation des cloisonnements : orientation longitudinale ou transversale ;
- le sens de circulation de la machine : trajets en aller-retour ou en boucle ;
- la vitesse de la machine : vitesse identique ou différente entre les cloisonnements principaux et les autres cloisonnements.

Les résultats sont illustrés dans la figure 2.

Avec une seule place de dépôt, c'est pour l'orientation longitudinale des cloisonnements que la distance parcourue est la plus courte (41 km), le débardage se faisant en aller-retour : aller à vide en marche arrière et retour en charge en marche avant. Ce scénario (①, figure 2) sert de référence de comparaison. L'orientation transversale rallonge de 56 % la distance parcourue si le débardage se

Caractéristiques machine et tonnages				
	Engin	Porteur		
	Produit	Bois énergie		
	Masse à vide (t)	18		
	Volume par tour (m ³ réel/tour)	8		
	Coefficient de conversion m ³ réel/t	1		
Scénario de vitesse		V 1	V 2	V 3
Vitesse (Km/h) sur le 1 ^{er} cloisonnement principal (sommère)	À vide	9	9	6
	En charge	8	8	5
Vitesse (Km/h) sur le 2 ^e cloisonnement principal	À vide	9	6	6
	En charge	8	5	5
Vitesse (km/h) sur autre cloisonnement	À vide	6	6	6
	En charge	5	5	5

Tab. 1 : données d'entrée pour le calcul du temps de débardage pour les 4 modalités citées dans le texte

fait en aller-retour (②) ; s'il se fait par boucle, l'allongement est en revanche de 46 % ou 10 % selon que le porteur transporte le dernier voyage de chaque cloisonnement partiellement rempli, c'est-à-dire à 60 % de charge (③) ou qu'il complète sa charge dans le cloisonnement voisin (④).

En ce qui concerne l'impact sur le **temps de débardage** (figure 2), seuls les temps de déplacement aller à vide et retour en charge ont été pris en compte (et non les temps de chargement, déchargement et autres, qui n'ont aucun lien avec les distances de parcours). Dans une configuration à une place de dépôt, l'orientation longitudinale (①) reste très efficace et prise en référence. L'orientation transversale allonge le temps de débardage de 30 % dans une organisation en aller/retour (②) alors que le scénario transversal en boucle (en utilisant un deuxième cloisonnement principal) réduit le temps de 6 % si les charges en fin de cloisonnement sont complétées avec le cloisonnement d'à côté (④) ; dans le cas contraire (③), il allonge le temps de 21 %. Dans les scénarios ③ et ④ si les vitesses sur le

deuxième cloisonnement principal sont identiques à celles de circulation à l'intérieur de la parcelle (cas V2), alors les allongements de temps sont respectivement de +37 % et +4 % par rapport au scénario de référence. Si les vitesses sur les cloisonnements à l'intérieur de la parcelle sont appliquées aux deux cloisonnements principaux (cas V3), alors les allongements de temps sont respectivement de 49 % et 14 %.

Du point de vue des **tonnages cumulés**, dans le scénario longitudinal avec débardage par aller-retour (figure 2 scénario ①), le tonnage cumulé en entrée d'un cloisonnement est de 265 t contre 130 t pour le scénario transversal avec débardage par aller-retour (scénario ②), soit une différence de -51 %. Pour les scénarios transversaux avec un débardage en boucle, dans le cas des derniers retours à 60 % de charge (scénario ③), le tonnage cumulé en sortie d'un cloisonnement est de 75 t alors que dans le cas des derniers retours complétés (scénario ④) il varie de 62 à 80 t. Par rapport au scénario longitudinal de référence, la réduction de tonnage est respectivement de 72 % et 70 à 77 %.

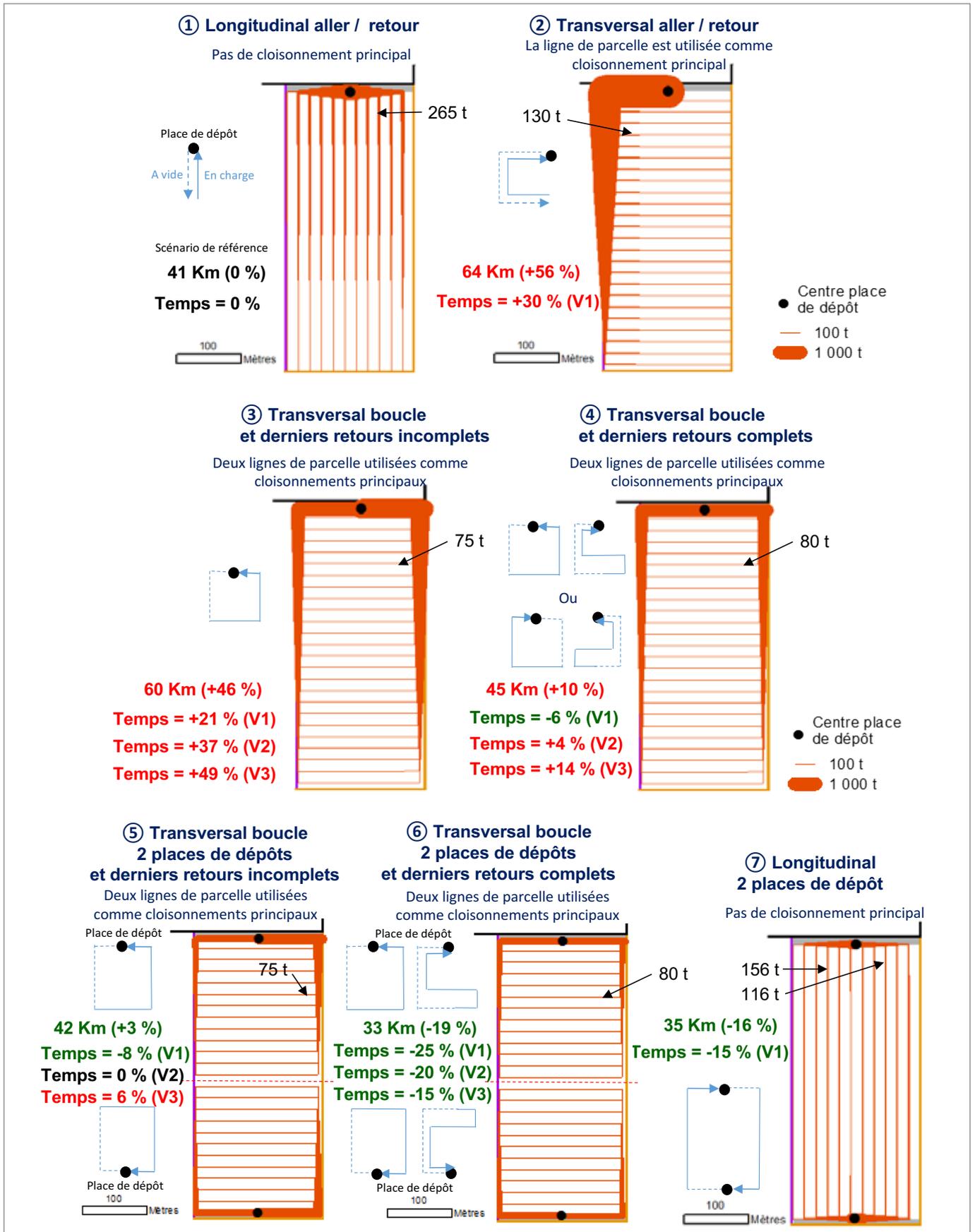


Fig. 2 : tonnages cumulés (somme des masses à vide du porteur et en charge) en fonction de l'organisation du débardage avec une seule place de dépôt ou deux ; simulation pour la récolte au porteur du bois énergie issue des houppiers lors de la coupe définitive (cf. tableau 2).

Avec deux places de dépôt, le scénario transversal est toujours le plus performant si les retours sont systématiquement complets (Ⓒ) : économie de distance de 19 % et de temps de 15 % (V3) à 25 % (V1) selon les vitesses prises en compte. Le cas de retours incomplets n'est intéressant sur la productivité (-8 %) que si les vitesses sur les deux cloisonnements principaux sont plus élevées (Ⓔ V1). Le scénario longitudinal permet d'économiser 16 % de distance et 15 % de temps (Ⓔ). Les tonnages cumulés, pour les cloisonnements non principaux, dans les scénarios Ⓔ et Ⓒ sont respectivement identiques aux scénarios Ⓓ et Ⓔ. Cependant, l'ajout de la deuxième place de dépôt permet de réduire les charges sur les cloisonnements principaux. Dans le cas du scénario longitudinal (Ⓔ), les tonnages cumulés en entrée de cloisonnement sont de 116 t et de 156 t en sortie, soit une différence de -41 % à -56 % par rapport au scénario de référence (Ⓓ).

L'organisation « idéale » qui ressort de cette analyse consiste à créer 2 places de dépôt, une à chaque extrémité de la parcelle, à orienter les cloisonnements dans le sens transversal et à débarquer en boucle (Ⓒ). Cela suppose cependant de pouvoir bien circuler sur les deux cloisonnements principaux (vitesse plus élevée que dans le peuplement) et que ces derniers soient en capacité de supporter les charges. Le trafic est reporté en périphérie, tout autant que les phénomènes de tassement et les risques d'orniérage accrus.

De plus, l'implantation des cloisonnements transversaux est plus simple sur le terrain et même s'il faut y passer un peu plus de temps, cela est insignifiant par rapport aux avantages concernant la rentabilité des opérations et l'impact au sol.

Avec une seule place de dépôt le scénario longitudinal est le plus performant mais il y a un fort trafic en

bout de cloisonnement. Du point de vue de la gestion durable de la traficabilité sur la parcelle, l'orientation transversale est toutefois à privilégier mais il y a un impact sur la productivité.

Quelles sont les charges qui transitent sur les cloisonnements tout au long de la vie d'un peuplement ?

Le choix du système de cloisonnements détermine l'intensité des passages sur chaque cloisonnement. Nous avons vu sur un exemple ponctuel, le débarquement des houppiers de la coupe définitive, que l'orientation transversale reporte le trafic en périphérie de la parcelle. Voyons maintenant les conséquences en nombres de passages et tonnages cumulés (masse de l'engin + masse du bois débarqué) sur toute la vie du peuplement. La simulation concerne la parcelle du bois de Ferrières (futaie régulière de chênes avec un sous-étage de

Âge du peuplement	Type d'intervention	Etage	Produit	Engin	Volumes prélevés (m³/ha)
25	Ouverture de cloisonnement		Bois énergie	Porteur	55
30	1 ^{ère} éclaircie		Bois énergie	Porteur	30
50	2 ^{ème} éclaircie		Bois énergie	Porteur	30
60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130	8 coupes d'amélioration	Futaie	Grume	Débusqueur	25/coupe
			Bois énergie	Porteur	20/coupe
		Taillis	Bois énergie	Porteur	20/coupe
140	Coupe de régénération	Taillis	Bois énergie	Porteur	10
		Futaie	Grume	Débusqueur	120
				Bois énergie	Porteur
		145		Coupe de régénération	Futaie
Bois énergie	Porteur		80		
150	Coupe définitive	Futaie	Grume	Débusqueur	120
			Bois énergie	Porteur	80
Total de 14 interventions					1 250

Tab. 2 : programme type des interventions en chênaie (+ sous-étage de charme) sur une révolution de 150 ans, dans le Bois de Ferrières

charmes) et porte sur une révolution de 150 ans, selon un programme de 14 interventions en forêt privée (tableau 2).

Deux types d'engin de débardage sont utilisés : pour les grumes, un débusqueur de 11 tonnes de masse à vide et 7 tonnes de charge et, pour les autres bois, un porteur de respectivement 18 t et 8 t. Par simplification, le porteur est modélisé à chaque intervention sur des produits bois-énergie, mais rappelons que l'orientation produit est fonction du marché et de la zone où se situe le chantier (en pratique, du bois d'industrie est également sorti). Par simplification aussi, nous considérons qu'un mètre cube de bois équivaut à une tonne. De plus, les chargements incomplets en fin de cloisonnement ont été regroupés lors des calculs : si la charge en fin de cloisonnement est inférieure à 20 % de la charge normale, on l'ajoute au chargement du trajet précédent ; si la charge est comprise entre 20 et 60 %, le chargement est regroupé avec le cloisonnement d'à côté dans la limite d'un seul regroupement ; dans les

autres cas le trajet se fait avec une charge incomplète.

Dans le cas d'un cloisonnement longitudinal avec une seule place de dépôt, on observe (figure 3) que les charges sont équitablement réparties entre les cloisonnements de la parcelle mais pas à l'intérieur de chaque cloisonnement, car les tronçons les plus éloignés de la place de dépôt sont beaucoup moins fréquentés que les tronçons qui s'en rapprochent. La ligne de parcelle (sommère) n'est pas sollicitée.

Dans le cas d'un cloisonnement transversal avec une seule place de dépôt, les passages et les charges se cumulent sur le cloisonnement principal (ligne de parcelle ; figure 4). Si on dispose d'un deuxième cloisonnement principal à l'autre extrémité des cloisonnements, le débardage s'effectue par boucle pour un porteur mais pas pour le débusqueur compte tenu des obstacles (grumes et houp-piers) en travers des cloisonnements. En moyenne (figure 5), la charge est divisée par 2 sur les extrémités des cloisonnements. Les cloisonnements

principaux doivent bien sûr être en capacité de supporter les charges.

Il ressort de cette analyse (et de la précédente) que pour réduire la pression sur les cloisonnements « ordinaires », il est possible d'augmenter le nombre de places de dépôt, à condition d'avoir les accès camions appropriés, et de renforcer le ou les cloisonnements principaux.

En résumé

La mise en œuvre du principe des cloisonnements d'exploitation nécessite une réflexion organisationnelle à conduire en amont de la réalisation. Cette réflexion a des conséquences pour toute la vie du peuplement. L'exemple de la parcelle rectangulaire « type » du bois de Ferrières montre qu'il n'y a pas de différence significative entre une orientation de cloisonnement longitudinale ou transversale ou oblique, en termes de surface de cloisonnement et par conséquent de surface boisée non circulée. L'espacement de 18 m permet aux engins de rester sur les cloisonnements et de couvrir grâce à la

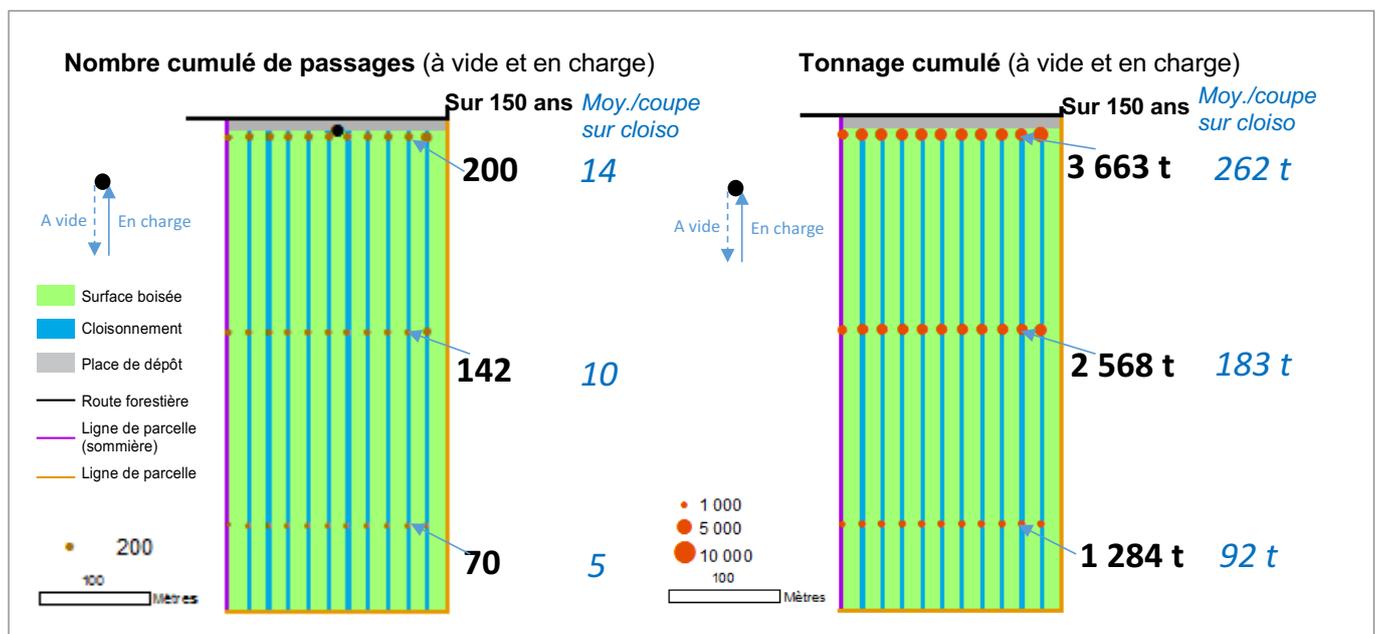


Fig. 3 : nombre cumulé de passages et tonnage cumulé pour les opérations de débardage sur l'ensemble de la révolution (150 ans), avec des cloisonnements longitudinaux et une place de dépôt
 En 150 ans, on observe 200 passages cumulant 3663 tonnes en sortie de chaque cloisonnement, soit en moyenne 14 passages et 262 tonnes par coupe et par cloisonnement d'exploitation.

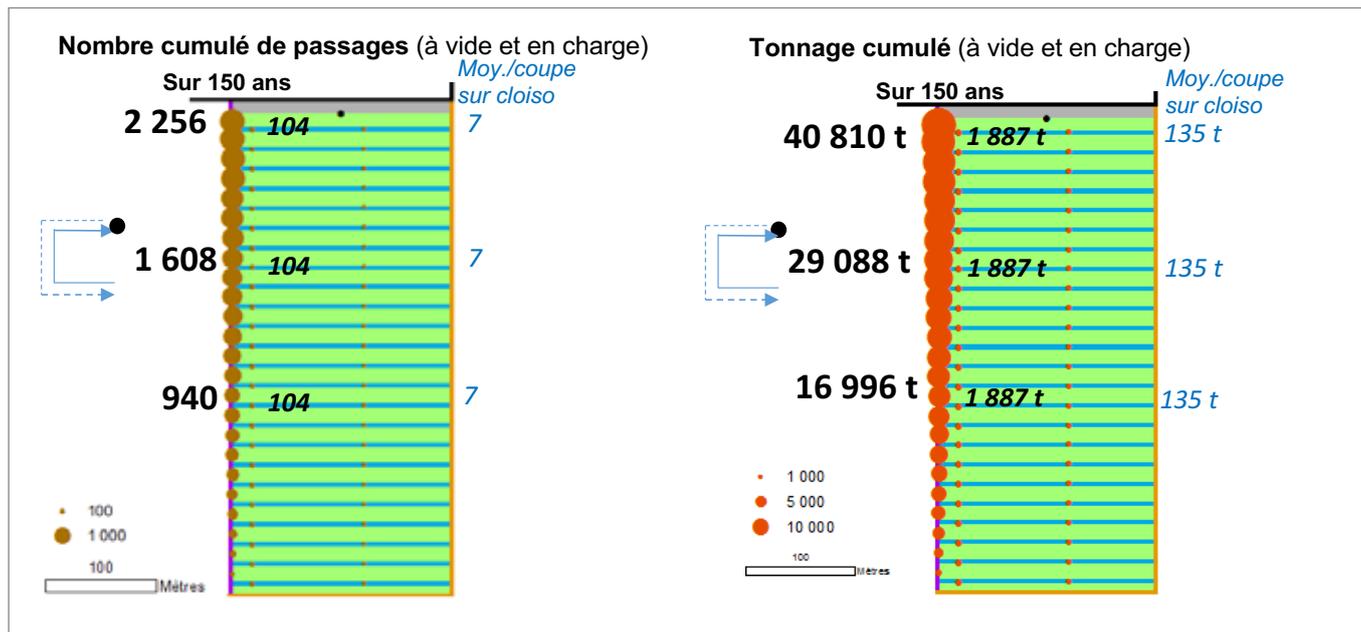


Fig. 4 : nombre cumulé de passages et tonnage cumulé pour les opérations de débarbage sur l'ensemble de la révolution (150 ans), avec des cloisonnements transversaux, une place de dépôt et un cloisonnement principal (débarbage par aller-retour)

En 150 ans, on observe 104 passages cumulant 1887 tonnes en sortie de chaque cloisonnement, soit en moyenne 7 passages et 135 tonnes par coupe et par cloisonnement d'exploitation. En revanche, à la sortie du cloisonnement principal, il y a 2256 passages cumulant 40810 t, soit en moyenne 161 passages pour 2915 t.

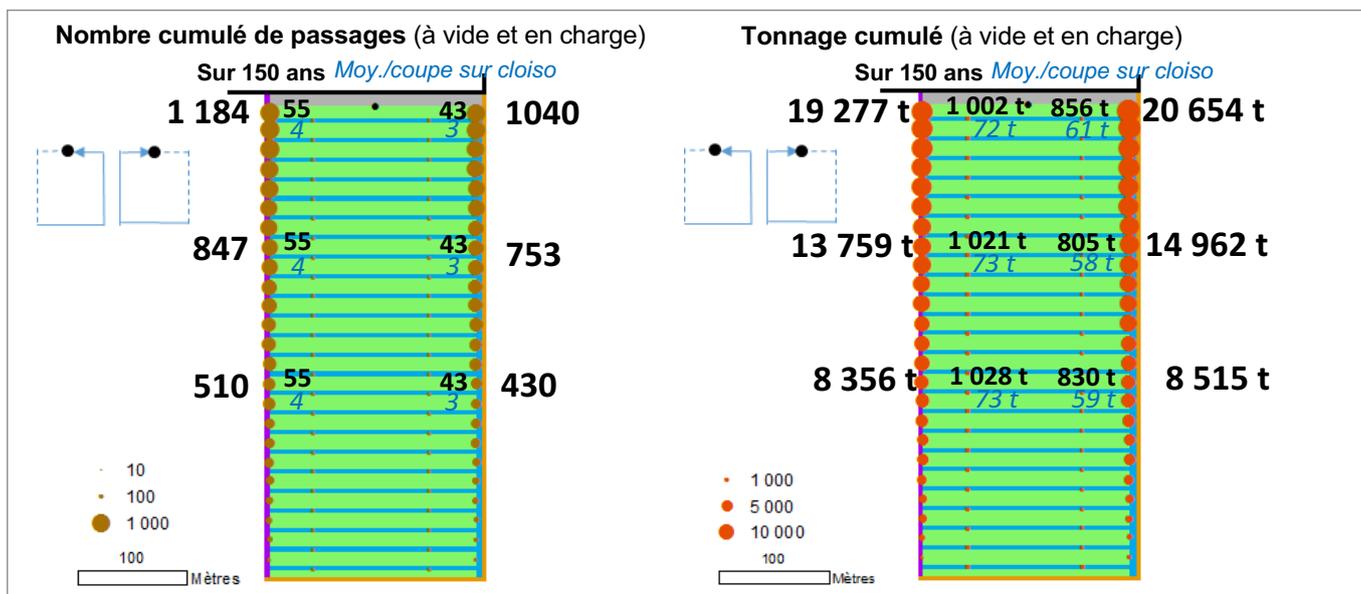


Fig. 5 : nombre cumulé de passages et tonnage cumulé pour les opérations de débarbage sur l'ensemble de la révolution (150 ans), avec des cloisonnements transversaux, une place de dépôt et deux cloisonnements principaux (débarbage en boucle)

En 150 ans, on observe 55 passages cumulant de 1002 à 1028 tonnes en sortie de chaque cloisonnement, soit en moyenne 4 passages et environ 72 tonnes par coupe et par cloisonnement d'exploitation. En revanche, à la sortie du cloisonnement principal, il y a 1184 passages à gauche et 1040 passages à droite cumulant 19277 t et 20654 t, soit en moyenne 85 et 74 passages pour 1377 t et 1475 t.

portée de leur grue toute la surface de la bande boisée. L'implantation des cloisonnements est conditionnée par les infrastructures d'accès à la parcelle et l'emplacement des places de dépôt, et doit s'adapter aux contraintes de la parcelle.

En termes de productivité, l'organisation qui consiste à créer 2 places de dépôt, une à chaque extrémité de la parcelle, à orienter les cloisonnements dans le sens transversal et à débarder en boucle (pour un porteur) ressort comme très efficace. Elle permet de réduire significativement les kilomètres parcourus et les temps de débardage par rapport au scénario à une seule place de dépôt. Cela suppose cependant que les deux cloisonnements principaux, c'est-à-dire les lignes de parcelle, soient aptes à supporter la circulation correspondante. De plus, l'implantation des cloisonnements transversaux est plus simple que celle des cloisonnements longitudinaux, et le temps supplé-

mentaire qu'on passe à les marquer au départ est insignifiant par rapport à l'amélioration de la rentabilité des opérations et aussi de l'impact au sol.

Avec une seule place de dépôt, le scénario longitudinal est le plus performant mais il y a un fort trafic en bout de chaque cloisonnement. Du point de vue de la gestion durable de la traficabilité sur la parcelle, l'orientation transversale est toutefois à privilégier mais il y a un impact sur la productivité.

Enfin, plus le porteur est petit, ce qui n'est pas forcément synonyme d'une pression au sol beaucoup plus faible, plus on augmente le nombre de trajets. Or ce nombre a aussi des conséquences sur la productivité du débardage et donc le bilan financier du chantier.

Christophe Ginet
Philippe Ruch

FCBA, pôle Approvisionnement
et 1^{ère} transformation



Photo : P. Ruch, FCBA

débardage de bois énergie au porteur

Tassement et orniérage : enseignements opérationnels pour l'organisation des exploitations

Avertissement : cet article a une portée très générale mais il se place implicitement dans le cadre de la récolte de bois en forêts publiques.

Au terme de ce dossier, on comprend que, pour réduire fortement les impacts au sol liés à la mécanisation forestière, il y a un ensemble de critères à considérer. Des critères liés à la façon dont les sols réagissent à la circulation répétée, des critères liés aux caractéristiques techniques des machines avec toute une palette de possibilités « vertueuses », et des critères liés à l'organisation des cloisonnements et de la circulation des engins. La première étape consiste, bien sûr, à mettre en place un réseau de cloisonnements d'exploitations pérenne et obliger tous les engins à ne circuler que sur ces cloisonnements (cf. fiche technique ONF « Implanter les cloisonnements d'exploitation » ; Mourey *et al.*, 2012).

Ensuite, l'objectif principal est de maintenir les cloisonnements d'exploitation dans un état réutilisable après chaque intervention, de manière à ce qu'aucun engin n'ait jamais à en sortir. À cette fin, nous récapitulerons en termes opérationnels les indications déterminantes liées au sol, d'une part, et au machinisme, d'autre part, puis nous élargirons à la planification et à l'organisation des exploitations, y compris en matière d'infrastructure, de façon à offrir aux intervenants (propriétaires/gestionnaires, exploitants forestiers, entrepreneurs de travaux forestiers et leurs salariés) des possibilités d'améliorer le fonctionnement des chantiers en forêts de plaines et collines.

Pour rappel, l'application des prescriptions générales du Règlement national d'exploitation forestière (RNEF) ainsi que les prescriptions spécifiques « sol » du référentiel national environnement et sécurité de l'ONF est obligatoire, que l'on soit en bois sur pied ou en bois façonnés. Elles sont transmises sous forme de clauses particulières dans les fiches articles lors d'une vente sur pied ou prescriptions au bon de commande vers les prestataires en bois façonnés.

Préconisations concernant l'état du sol

On ne peut pas raisonnablement exiger du « zéro impact » au nom de la protection des sols, car cela exclurait presque toute activité d'exploitation. Il faut donc établir un compromis acceptable permettant de maintenir indéfiniment la praticabilité des cloisonnements d'exploitation.

Les connaissances scientifiques récentes indiquent que l'on ne peut pas compter sur la période de « repos » entre deux interventions pour obtenir une restauration naturelle, même pour des dégâts de tassement apparemment légers. Par contre, en 5-7 ans les ornières peu profondes se seront en partie érodées, et le sol des bourrelets se sera restructuré partiellement en surface sous l'effet des micro- et macroorganismes, des apports de matière organique (chute des feuilles), de l'eau, des périodes sèches et du froid (gel).

Ce laps de temps de 5 à 7 ans correspond souvent à l'intervalle entre deux interventions. Dans certains cas cependant, notamment dans des régions fertiles et bien arrosées donnant lieu à de forts accroissements, les rotations peuvent être plus courtes, c'est-à-dire 3 à 4 ans. La fréquentation des parcelles dans le jeune âge (3 premières éclaircies) est alors particulièrement intense et toute erreur aura des conséquences importantes sur les opérations suivantes jusqu'à la fin de la vie du peuplement et même au-delà. Les futurs intervenants seraient amenés à se déporter dans les bandes boisées, augmentant ainsi la surface circulée et donc tassée.

Observer des seuils d'alerte

Les voies situées à l'intérieur de la parcelle doivent être faiblement affectées pour pouvoir être maintenues en état praticable à long terme. Cependant, il ne semble pas réaliste d'avoir le même niveau d'exigence pour les voies qui concentrent une grosse part de la circulation (collecteurs ou cloisonnements principaux), car l'opérateur n'a pas d'autre choix que de les emprunter fréquemment.

Certaines études scientifiques, notamment allemandes ou suisses (voir les deux premiers articles de ce dossier), proposent dans un cadre scientifique des seuils de profondeur d'ornière et de linéaires de cloisonnement impactés en fonction de la sensibilité des sols. Généralement des

notions de seuil sont évoquées sur la longueur du cloisonnement. Dans le cadre d'une gestion pragmatique et réaliste des chantiers forestiers, nous proposons **les deux recommandations de seuils d'alerte du guide PRATIC'SOLS** (Pischedda et Helou, 2017), qui a fait l'objet d'une large concertation avec l'ensemble des acteurs concernés de la filière (ONF, FNEDT, FCBA, CNPF et des gestionnaires et entrepreneurs forestiers de Bourgogne, Lorraine et du Centre) :

- **pour les cloisonnements d'exploitation simples** (dans la parcelle) : dès l'apparition des premières ornières de 20 cm de profondeur ; l'idée est donc de bien rester en-deçà de cette profondeur, de sorte que les cloisonnements restent praticables pour tous les engins, du plus petit au plus grand ;
- **pour les cloisonnements d'exploitation principaux** (ou collecteurs) sur lequel débouchent les cloisonnements simples) : dès l'apparition des premières ornières de 30 cm de profondeur.

Ces seuils pourraient être amenés à évoluer en fonction des retours d'expériences de ces premières recommandations. Les résultats des études scientifiques disponibles inciteraient en effet à des seuils plus bas, mais déconnectés des possibilités actuelles de la filière. Il faut donc procéder par étapes itératives.

Quoi qu'il en soit, les seuils d'alerte sont à surveiller pendant toute la durée du chantier, par l'ensemble des intervenants. Dès qu'ils sont atteints, le chantier doit être arrêté et une discussion doit s'engager entre les acteurs concernés pour convenir de la suite à donner. Le plus souvent, il faudra attendre une période de météo favorable pour reprendre les opérations. On trouvera dans le guide PRATIC'SOLS un mode opératoire pour que les chantiers se déroulent dans le respect de ces seuils.

Limiter le nombre de trajets par cloisonnement

Comme on l'a vu au début de ce dossier (cf. « État des connaissances »), c'est le plus souvent dès le 4^e passage d'un engin sur sol sensible et humide que la profondeur des ornières atteint 10 cm, et c'est après 6 à 10 passages (en charge) qu'elle atteint 15 cm (Haas *et al.*, 2014). Il faudrait donc pouvoir limiter la circulation des engins à 6 à 10 passages par cloisonnement, pour ne pas risquer de dépasser cette profondeur et de rendre les cloisonnements impraticables.

Cela semble possible sur les cloisonnements d'exploitation « simples » car chacun d'eux n'est en principe parcouru que jusqu'à ce que tout le bois qui s'y trouve ait été débardé. Mais sur les cloisonnements d'exploitation principaux (collecteurs), qui concentrent la plupart des passages entrants et sortants d'une parcelle, on peut observer bien plus d'une dizaine de passages par coupe, selon l'accessibilité, la taille et la forme de la parcelle (cf. article précédent), mais aussi le nombre de produits (nous y venons plus loin).

Considérations liées au machinisme

Nous avons vu au fil du dossier que, pour réduire l'impact au sol, les solutions techniques les plus efficaces à coût raisonnable sont l'élargissement des roues (adopter des roues de 800 à 940 mm) et l'utilisation sur toutes les paires de roues de tracks « marais » dont les tuiles débordent de 20 à 30 cm (soit 10-15 cm de chaque côté de la roue). Rappelons que les vrais tracks « marais » ont des tuiles larges, vraiment plates et très peu espacées. L'utilisation de tracks en matière synthétique est aussi une alternative intéressante, notamment car il est possible de les conserver sur les routes forestières, mais plus onéreuse. Ces améliorations permettent d'augmenter la plage (ou taux) d'utilisation des engins dans

des régions où la majorité de chantiers concernent des sols sensibles au tassement et à l'orniérage.

D'après l'expérience pratique accumulée en plusieurs années de travail sur le thème de ce dossier (ONF – RDI et gestion –, FCBA), nous proposons au tableau 1 une schématisation fictive mais réaliste des périodes d'activité possible pour des porteurs « classiques » (8 roues) sur sols très sensibles, en fonction de la météorologie moyenne de l'année. En année sèche, ils peuvent travailler pleinement pendant 9,5 mois contre à peine 3 mois en année très humide. Même en incluant les périodes de travail partiel, c'est-à-dire ne permettant pas de travailler tous les jours de la semaine ou du mois, la durée annuelle de travail possible passe de 9,5 mois à 4,5 pour les années les plus humides. Ces années-là, les entreprises équipées d'engins classiques seront obligées pour maintenir leur activité de changer de secteur... à condition de pouvoir disposer de chantiers de repli.

De la même façon le tableau 2 compare, pour une année très humide, les durées de travail possible des porteurs classiques, nus ou équipés des meilleurs tracks (au regard de l'impact au sol), et des machines spéciales « faible impact » (cf. articles « Étude de cas » de ce dossier). La durée de plein travail passe de 2,75 mois pour un porteur classique 8 roues sans tracks à 5,25 mois pour un porteur spécialisé « faible impact ». Avec les périodes de travail partiel, on arrive à 4,5 mois pour le porteur classique, contre 8,5 mois pour un porteur spécial « faible impact » à condition qu'il bénéficie d'une organisation dédiée et sans faille.

Recommandations pour la planification et l'organisation des chantiers

L'exigence de préservation des sols ramène toujours à la nécessité d'une organisation active et préventive des chantiers d'exploitation. L'organisation est véritablement le point central de la démarche de réduction des impacts, et de son succès. Elle implique plusieurs intervenants (notamment le propriétaire, le prestataire et son donneur d'ordre). L'organisation doit se raisonner bien en amont du chantier, et non à l'imminence du démarrage du chantier, dans le cadre d'une réflexion plus large portant sur une surface forestière conséquente : un ensemble de parcelles qui peut totaliser quelques centaines à quelques milliers d'hectares. L'effort d'organisation aura un impact positif sur la production

annuelle et pourra donc contribuer à un meilleur bilan financier pour l'entrepreneur, car il pourra réaliser plus de chantiers, en particulier s'il peut se ménager des chantiers de repli sur sol praticable toute l'année.

Améliorer l'adéquation entre sensibilité des chantiers et équipement des ETF

Pour les chantiers dont les produits sont destinés à des ventes de bois façonné, la gestion, la planification et l'encadrement des chantiers sont gérés par les équipes de l'ONF. Dans le cadre des marchés publics d'exploitation, souvent pluriannuels, elles peuvent sélectionner des entrepreneurs par rapport à leur équipement voire même les inciter à investir dans des équipements adaptés. Ces marchés raisonnés à l'échelle d'une ou plusieurs agences (voire DT) selon la

géographie des massifs, permettent de grouper les chantiers sensibles afin d'optimiser l'intervention d'un entrepreneur doté du bon équipement. Cela a l'avantage pour l'ETF de rentabiliser le transport de ses engins et donc de diminuer son coût technique, et pour le gestionnaire d'augmenter le temps de travail effectif sur les chantiers.

Pour les bois vendus sur pied, les prescriptions générales du règlement national d'exploitation forestière (RNEF) et les clauses particulières de la fiche article donnent les informations nécessaires à l'acheteur pour adapter ses moyens d'exploitation. Mais l'ONF n'a pas la possibilité d'influencer directement le matériel des acheteurs. En effet, le RNEF donne des obligations de résultats et non de moyens.

Type d'année	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Nombre de mois à plein emploi	Nombre de mois à emploi partiel	Nombre de mois sans travail	Total
Année sèche + hiver très froid	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	9,5	0	2,5	12
Année « normale »	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	4,5	5	2,5	12
Année plus humide	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	3,75	2,75	5,5	12
Année très humide	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	2,75	1,75	7,5	12

Tab. 1 : représentation schématique du temps de travail possible pour des porteurs « classiques » dans des chantiers à sol sensible en fonction de la météorologie moyenne de l'année
Porteur 8 roues sans option particulière

- travail pleinement possible
- travail partiellement possible, en fonction du taux d'humidité du sol ou s'il est gelé
- travail impossible, car sol trop humide
- travail impossible pour autres prescriptions environnementales (ex : espèces remarquables)

Année très humide Type de porteur	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Nombre de mois à plein emploi	Nombre de mois à emploi partiel	Nombre de mois sans travail	Total
Porteur classique sans tracks	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	2,75	1,75	7,5	12
Porteur classique avec les meilleures tracks	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	4,5	2,5	5	12
Porteur spécial « faible impact »	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	5,25	3,25	3,5	12

Tab. 2 : représentation schématique du temps de travail possible en année pluvieuse extrême dans des chantiers à sol sensible, selon le type d'engin : porteur classique « nu » (= dernière ligne du tableau 1) ou équipé des meilleurs tracks, ou machine spéciale « faible impact ».
(Légende : idem tableau 1)

Prévoir plusieurs places de dépôt par chantier et organiser la circulation dans la parcelle

Le nombre de passages (à vide ou en charge) dans les cloisonnements est fonction de la taille de la parcelle, de l'entre-axe des cloisonnements d'exploitation, du prélèvement à l'hectare, de la charge utile des engins mais aussi de l'emplacement et du nombre de places de dépôt. Depuis plusieurs années, la création de places de dépôt en forêt augmente, et c'est une tendance qui doit être renforcée. On a besoin de places de dépôt aménagées « en dur », qui relèvent de l'infrastructure pérenne, et on peut en outre recourir à des places de dépôt « en terrain naturel » au bord des routes forestières pour un stockage de courte durée à l'occasion de certaines interventions.

Les grandes parcelles, avec un volume récolté à l'hectare important, devront être subdivisées en zones, chaque zone disposant de sa (ses) place(s) de dépôt et de ses propres collecteurs. Il faut donc pouvoir proposer non pas une, mais 2 à 4 places de dépôt (aménagées ou non) par chantier en fonction du volume total du chantier. Cependant il n'est pas toujours facile d'installer plusieurs places de dépôt, car cela dépend des accès, de la configuration de la parcelle et des limites de la propriété. En tout cas, il faut toujours essayer d'adapter leur nombre le mieux possible, en veillant bien sûr qu'elles soient accessibles aux camions. Nous présentons en encadré un exemple fictif qui aide à comprendre comment la multiplication des places de dépôt permet d'organiser la circulation pour diminuer le nombre de passages sur les cloisonnements.

Réduire le nombre de produits et veiller à leur adéquation avec l'équipement de débardage

Dans un chantier à plusieurs produits, la pratique habituelle est de débarder chaque produit séparément pour ne pas avoir à trier sur la place de dépôt. Avec la multiplication des produits (notamment en cas de mélange d'essences ou de qualités hétérogènes), il en résulte une forte augmentation de la fréquentation des cloisonnements.

Dans les conditions de sol les plus sensibles, il faut tout particulièrement rationaliser le nombre de produits pour diminuer les trajets, ou bien prévoir de les débarder ensemble si c'est possible et faire ensuite le tri sur la place de dépôt.



P. Ruch, FCBA

Fig. 1 : débardage de grumes de chênes non pas au débusqueur mais avec un porteur de 9 tonnes de charge utile muni d'une grue, et dûment équipé de tracks, pour limiter les impacts

Une simulation de l'intensité du trafic selon le nombre de places de dépôt

Nous avons choisi le cas d'une parcelle fictive rectangulaire de 6 hectares (200*300 m), disposant de 12 cloisonnements d'exploitation (entre-axe de 18 m) orientés dans le sens de la longueur, et de 3 cloisonnements principaux dans le sens transversal : un à chaque extrémité et un au milieu de la parcelle. En supposant un prélèvement de 84 m³ par hectare, le prélèvement total du chantier est de 504 m³, ce qui donne 42 m³ à sortir par cloisonnement d'exploitation. Les porteurs n'utilisent que rarement toute leur charge utile en raison du foisonnement, notamment lorsqu'ils débardent du bois énergie en tronçons d'arbres entiers ou de houppiers (le foisonnement est bien moindre pour des billons). Selon nos études récentes (ex. : Ulrich *et al.*, 2015) il est plus réaliste de calculer avec une moyenne de 60 % de la charge utile. Dans notre simulation, un petit porteur (7 tonnes de charge utile) et un porteur moyen (14 tonnes) transporteront donc respectivement 4,2 et 8,4 tonnes. Nous parlons ici de porteurs classiques sans équipement spécifique.

S'il n'y a qu'une place de dépôt (en blanc sur le schéma), l'engin de débardage doit faire des allers à vide et des retours en charge sur tous les cloisonnements d'exploitation, le cloisonnement principal le plus proche de la place de dépôt étant le plus fréquenté. Le petit et le moyen porteurs doivent faire respectivement 10 ou 5 allers-retours (20 ou 10 passages) par cloisonnement « simple ». Sur le cloisonnement principal il faudra 60 allers-retours (120 passages) pour le porteur moyen, et le double pour le petit porteur.

Avec deux places de dépôt diagonalement opposées (en blanc et en rose), les voyages se font toujours de la première vers la seconde et vice versa. Il n'y a pas de voyages à vide, car

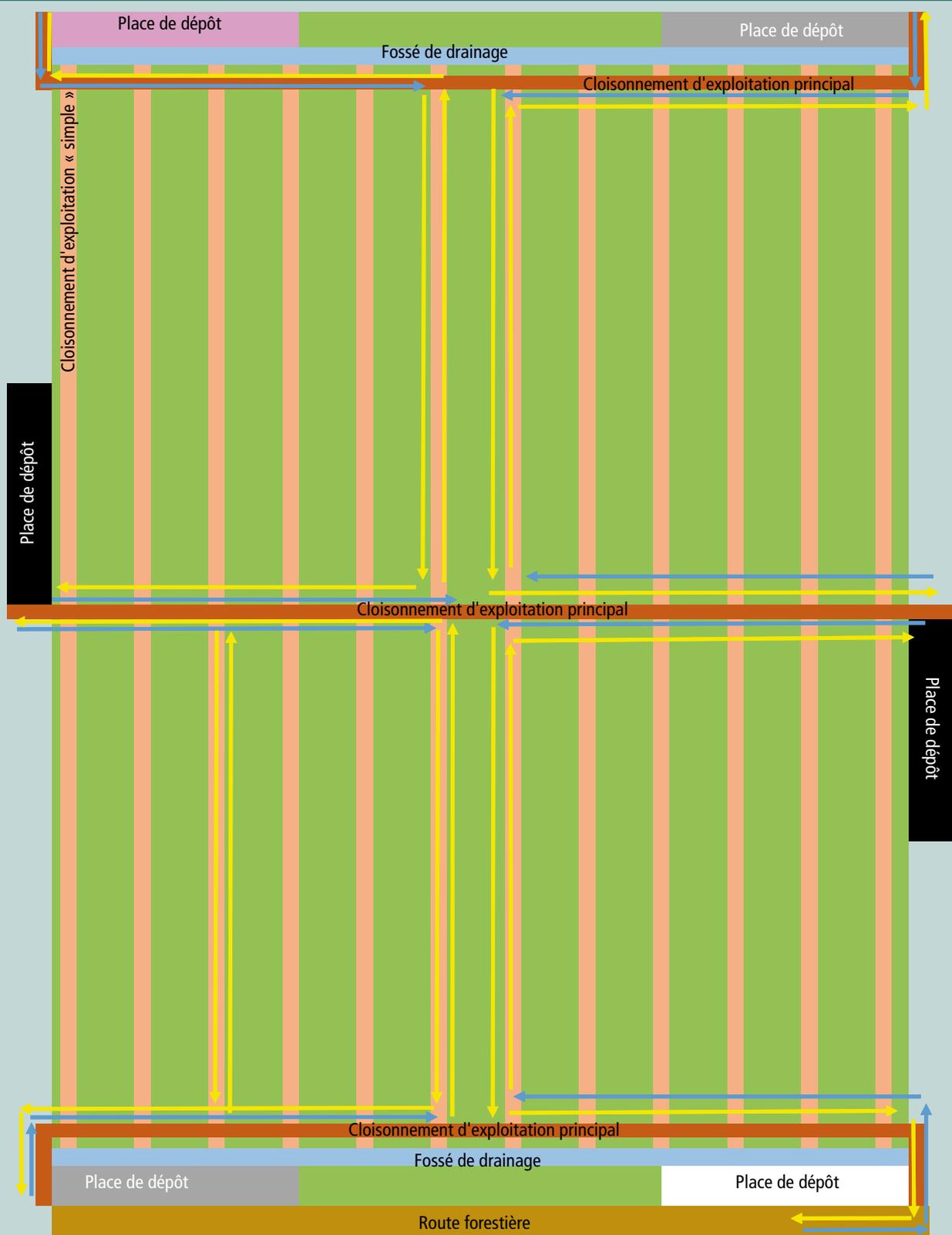
chaque « aller » permet de charger des produits pour les amener vers l'autre place de dépôt. Ainsi le nombre de passages est réduit de moitié sur tous les cloisonnements.

Lorsqu'on passe à 4 places de dépôt (en blanc, rose et gris), la parcelle est divisée de fait en 4 zones ayant chacune sa propre place de dépôt ; cela n'améliore pas la fréquentation des cloisonnements simples, mais réduit encore de moitié celle des cloisonnements principaux, qui tombe à 30 allers-retours pour le petit porteur et 18 pour le porteur moyen. C'est donc une nette amélioration.

L'augmentation supplémentaire à 6 places de dépôt (toutes les couleurs) ne change rien à la fréquentation des cloisonnements principaux en bout de parcelle. Par contre, le cloisonnement principal du milieu sera très fréquenté, contrairement aux trois scénarios précédents. Pour les cloisonnements simples, avec 5 ou 3 passages selon l'engin on est enfin dans la gamme de fréquentation qui, d'après l'étude de Haas *et al.* (2014), permettrait à un porteur sans équipement spécifique de débarder sur sol sensible humide sans provoquer d'ornières de plus de 10 ou 15 cm de profondeur (cf. article « État des connaissances », tableau 1 p. 34). Mais cette approche reste théorique, car il ne sera que très rarement possible de prévoir autant de places de dépôt.

Dans tous les cas, il faut trouver une solution pour les cloisonnements principaux. Une possibilité pourrait être d'y accumuler autant de rémanents que possible (ex. houppiers et autres branchages), afin d'augmenter fortement la portance et surtout d'éviter la création d'ornières profondes. Mais il faut savoir que cela augmente le coût de l'exploitation, et que ce n'est pas faisable en cas d'exploitation d'arbres entiers.

Nombre de places de dépôt	Charge utile du porteur (utilisée à 60 %)	Fréquentation par cloisonnement d'exploitation « simple »	Fréquentation par cloisonnement d'exploitation principal (= collecteur)		Volume moyen par place de dépôt
			en bout de parcelle	en milieu de parcelle	
1	7 tonnes	10 allers-retours (20 passages)	120 allers-retours (240 passages) sur le collecteur côté place de dépôt	aucune	504 m ³
	14 tonnes	5 allers-retours (10 passages)	60 allers-retours (120 passages) sur le collecteur côté place de dépôt	aucune	
2	7 tonnes	10 allers (10 passages)	120 allers (120 passages) pour chacun des deux collecteurs	aucune	252 m ³
	14 tonnes	5 allers (5 passages)	60 allers (60 passages) pour chacun des deux collecteurs	aucune	
4	7 tonnes	5 allers-retours (10 passages) par demi-cloisonnement	30 allers-retours (60 passages) pour chacun des deux collecteurs	aucune	126 m ³
	14 tonnes	3 allers-retours (6 passages) par demi-cloisonnement	18 allers-retours (36 passages) pour chacun des deux collecteurs	aucune	
6	7 tonnes	5 allers (5 passages) par demi-cloisonnement	30 allers (30 passages) pour chacun des deux collecteurs	60 allers (60 passages)	84 m ³
	14 tonnes	3 allers (3 passages) par demi-cloisonnement	18 allers (18 passages) pour chacun des deux collecteurs	36 allers (36 passages)	



Parcelle type avec 1 à 6 places de dépôt permettant de contrôler la fréquentation des cloisonnements d'exploitation (entre-axe = 18 m) lors du débardage.

Légende : Les couleurs des places de dépôt permettent de visualiser la disposition et le nombre croissant de place de dépôt mentionné dans le texte. Les flèches représentent le trajet du porteur à vide (en bleu) et chargé (en jaune) dans le cas de l'utilisation de 6 places de dépôt et permettant de visualiser les 4 zones de travail liées à ces 6 places de dépôt.

Quelles solutions pour les chantiers à contraintes trop importantes ?

Dans certaines configurations contraintes par les infrastructures (desserte, places de dépôt) ou la structure foncière, il y aura des cas où l'ensemble de ces recommandations restera inopérant. Certains chantiers cumulent trop de contraintes, où ni l'organisation, ni le choix d'un engin sur roues plus vertueux ne pourront permettre d'atténuer suffisamment les impacts pour garder les cloisonnements en bon état.

Préserver les collecteurs en cas de trafic intense

Lorsque les collecteurs ont à supporter un trafic particulièrement intense pour l'entrée et la sortie de la parcelle, il faut anticiper les solutions techniques possibles avant ou après l'exploitation pour les maintenir en état praticable : par exemple, la circulation sur une épaisse couche de rémanents qui nécessite un travail de ramassage sur une partie de la parcelle, ou le renforcement par apport de granulat, ou encore une remise en état adéquate.

Changer de mode de débardage

La palette des modes de débardage alternatifs est malheureusement restreinte. Actuellement la seule vraie alternative est le câble-mât. En plaine, il peut être utilisé pour des distances de débardage allant de 100 à 500 m (Pischedda *et al.*, 2008). Les coûts d'exploitation sont beaucoup plus élevés que le débardage classique et cette méthode nécessite un grand savoir-faire technique. D'après la FNEDT, il existe 18 entreprises équipées de ce matériel en France en 2016, et quelques-unes travaillent occasionnellement en plaine. Toutefois ces dernières années, on observe un frémissement pour des chantiers de plaine très bien préparés.

Une autre possibilité serait de débarder une partie des grumes non pas au débusqueur mais avec un porteur muni d'une grue puissante et équipé

de tracks (figure 1). Cela éviterait une partie des impacts provoqués par les débusqueurs.

Constituer des stocks de bois

Dans le passé la constitution de stocks de bois était courante. Le fonctionnement en flux tendu a fait disparaître petit à petit cette pratique. Force est de constater que de longues périodes pluvieuses peuvent conduire à une rupture d'approvisionnement des usines ; le coût induit (ex. chômage technique) peut égaler voire dépasser le coût de maintien de stocks de bois. Il est donc conseillé de réfléchir à la mise en place de réseaux de stocks de bois, gérés de manière dynamique (enlèvement et approvisionnement régulier, même pendant les périodes plus sèches). Le nombre, la distribution géographique, la taille et le financement de ces stocks sont à définir en concertation avec les acteurs concernés.

Conclusions : conjuguer les efforts, sensibiliser tous les intervenants

La gestion durable des sols forestiers pour ce qui concerne l'exploitation nécessite une forte sensibilisation de tous les intervenants. Cependant les possibilités dont ils disposent pour diminuer les impacts de tassement et d'orniérage sont limitées. La réduction de ces impacts à grande échelle ne réussira que lorsque toutes les parties prenantes travailleront ensemble pour conjuguer leurs efforts. D'ores et déjà, le déploiement du guide Pratic'sols (initiative ONF, FNEDT et FCBA, financé par France-Bois-Forêt) va dans ce sens car les intervenants devront se concerter à ce sujet dans les territoires.

Des formations pourront être envisagées dans le cadre des cursus existants d'opérateurs de machines forestières et aussi dans celles des gestionnaires forestiers. L'objectif est d'améliorer la compréhension des contraintes mutuelles et de faire émerger les synergies potentielles qui

permettront d'y arriver. L'ambition première est de viser à diminuer d'un facteur deux, voire trois, le nombre de passages sur les cloisonnements.

Par ailleurs, plusieurs projets de R&D en cours travaillent sur le développement d'outil permettant in fine d'améliorer la qualité des prévisions de la sensibilité des sols en lien avec la pluviosité et l'évapotranspiration (projet européen EFFORTE). S'organiser en connaissant mieux la traficabilité (variable selon la météo), c'est non seulement protéger les sols mais aussi prévenir toutes sortes de situations pénalisantes pour les entreprises comme les interruptions de chantier ou les déplacements d'équipes et de machine.

Erwin Ulrich

ONF, pôle RDI

Fontainebleau-Compiègne

Philippe Ruch

FCBA, pôle Approvisionnement

et 1^{re} transformation

Didier Pischedda

ONF, expert national exploitation

forestière et logistique

Emmanuel Cacot

FCBA, pôle Approvisionnement

et 1^{re} transformation

Noémie Pousse

ONF, pôle RDI Nancy

Maryse Bigot

ONF, chargée de mission

bois façonnés – contrats

d'approvisionnement

Dossier « Tassement, orniérage, machinisme forestier et organisation des exploitations en forêts feuillues de plaine et collines »

Bibliographie

Ampoorter E., de Schrijver A., van Nevel L., Hermy M., Verheyen K., 2012. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, vol. 69 (5) pp.533-542

Biernath J., 2016 : Zangen-Beschwörer. *Forstmaschinen-Profi* Dezember 2015, pp. 18-23

Bonnemazou M., Ruch P., Cacot E., 2016 : Les ventes d'engins forestiers en France 2015 : principaux résultats. *FCBA INFO*, Juin 2016, 7 p.

Bottinelli N., Capowiez Y., Ranger J., 2014 a. Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology* vol. 73, pp. 130-133

Bottinelli N., Hallaire V., Goutal N., Bonnaud P., Ranger J., 2014b. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma* vol. 217-218, pp. 10-17

Brais, S. 2001. Persistence of Soil Compaction and Effects on Seedling Growth in Northwestern Quebec. *Soil Science Society of America Journal* vol. 65, pp. 1263-1271

Cacot E., Peuch D., 2006 : Observatoire des impacts de l'exploitation forestière. *AFOCEL*. Fiche n° 3-2006 – n° 733, 6 p.

Cacot E., Bonnemazou M., Grulois S., Magaud P., Morillon V., Perionot

C., Peuch D., Ruch P., Thivolle-Cazat A., 2015 : Enjeux et perspectives de la mécanisation en exploitation forestière à l'horizon 2020. *FCBA-COPACEL*, 15p.

Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi M., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils : A review. *Forest Ecology and Management*, vol. 338 pp. 124-138

Capowiez Y., Cadoux S., Bouchand P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 41, pp. 711-717

Chavet P., 2008: Le débardage par câble en plaine. *La Forêt privée*, n° 303, pp.51-53

Ebeling C., Lang F., Gaertig T., 2016. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. *Forest Ecology and Management* vol. 359, pp. 74-82

Encke B.-G., 2010. Bodenschutz durch Aufstandsfläche, *AFZ-Der Wald*, n°21 pp.14-15

Froehlich H.A., Miles D.W.R., Robbins R.W., 1985. Soil Bulk Density Recovery on Compacted Skid Trails in Central Idaho1. *Soil Science Society of America Journal* vol. 49, p. 1015

Gabriel O., 2014. Timbear in Konkurs. <en ligne : www.forstpraxis.de/timbear-in-konkurs> (dernière consultation mai 2017)

Goutal N., 2012 : Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. Thèse de doctorat, spécialité Science du sol, AgroParisTech Nancy. Nancy : AgroParisTech. 221 p.

Goutal N., Boivin P., Ranger J., 2012. Assessment of the natural recovery rate of soil specific volume following forest soil compaction. *Soil Science Society of America Journal* vol.76, pp.1426-1435

Goutal-Pousse N., Bock J., Ranger J., 2014. Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. *Rendez-Vous Techniques de l'ONF* n° 43 pp. 33-39

Haas J., Hagge Ellhöft K., Schack-Kirchner H., 2014. Praxisversuch Spurgleisbildung bei der Befahrung mit Forwardern Vergleich unterschiedlicher Bereifungsvarianten hinsichtlich Erhaltung der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen in der mechanisierten Holzernte. Rapport final. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Bodenökologie. 18 p.

Heubaum F., Padberg A., 2014 : Praxisprojekt zur bodenschonenden Holzernte mit Boogie-Bändern. *AFZ-Der Wald* n° 17 pp. 16-20

Horn R., 2004. Time Dependence of Soil Mechanical Properties and Pore Functions for Arable Soils. *Soil Science Society of America Journal* vol. 68 p. 1131

Kremer J., 2008. Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. LWF aktuell n° 67, pp. 13-15

Lamandé M., Ranger J., Lefèvre Y., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols. Paris : ONF. Direction technique – Coll. Les Dossiers forestiers, n° 15 - 131 p.

Lewin F., Peuch D., 2004. Qualifier le cheminement des porteurs pour réduire les impacts sur l'environnement grâce à la technologie GPS. Fiche Information Forêt AFOCEL n° 697

Lister T.W., Burge, J.A., Patterson S.C., 2004. Role of Vegetation in Mitigating Soil Quality Impacted by Forest Harvesting. Soil Science Society of America Journal vol.68, pp.263–271

Löfgren B., Englund M., Forsberg N., Jönsson P., Lundström H., Wästerlund I., 2010 : Spårdjup och vibrationer för banddrivna skotare Lightlogg C och ProSilva. Arbetsrapport, Skogsforsk Nr. 736 2011, ISSN 1404-305 X, 32 p.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjebak S., Thees O., 2009. Protection physique des sols en forêt, Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. Notice pour le praticien, 45, ISSN 1012-6554, WSL, 12 p.

Mourey J. M., Pischedda D., Lefebvre L., 2012. Planter les cloisonnements d'exploitation. Fiche technique ONF – Sol, n° 7

ONF, 2009. Note de service 09 – T-297 Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols. 8 p. + annexe

ONF, 2008. Règlement national d'exploitation forestière. Paris : ONF. 52 p.

ONF, 2010. Règlement national de travaux et services forestiers. Paris : ONF. 45 p.

Page-Dumroese D.S, Jurgensen M.F., Tiarks A.E., Ponder F. Jr., Sanchez

F.G., Fleming R.L., Kranabetter J.M., Powers R. F., Stone D.M., Elioff J.D., Scott, D. A., 2006. Soil physical property changes at the North American Long-Term Soil Productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. Canadian Journal of Forest Research vol.36, pp. 551–564

Pischedda D., Bartoli M., Chagnon J.-L., 2008. Pour une exploitation respectueuse des sols, des systèmes complémentaires existent. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 19, pp. 34-42

Pischedda D. (coord.), 2009 : Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL » – Guide pratique. Edition ONF-FCBA, ISBN 978-2-84207-334-3, 110 p.

Pischedda D., Helou T. E. (coord.), 2017. Guide sur la praticabilité des parcelles forestières PRATIC'SOLS. Paris : ONF, FNEDT.

Pires L.F., Cooper M., Cássaro F.A.M., Reichardt K., Bacchi O.O.S., Dias N.M.P., 2008. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. CATENA vol. 72, pp. 297–304

Powers R.F., Andrew Scott D., Sanchez F.G., Voldseth R.A., Page-Dumroese D., Elioff J.D., Stone D.M., 2005. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. Forest Ecology and Management vol. 220, pp. 31–50

Rab M.A., 2004. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. Forest Ecology and Management vol. 191 pp. 329–340

Ranger J., Pousse N., Bonnaud P., 2012. Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la res-

tauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Champenoux : INRA. UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers, 66 p.

Ranger J., Goutal Pousse N., Bonnaud P., Bedel L., Davesne R., Demaison J., Nourrisson G., 2015. Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Champenoux : INRA

Ruch P., 2014. Pour une exploitation forestière respectueuse sur sols peu portants : retour d'expériences d'Allemagne. La Mécanisation forestière n° 149 pp. 14-16

Ruch P., 2015. Les trains de chenilles pour engin à roues. La Mécanisation Forestière, n° 152 pp. 27-30

Ruch P., Montagny X., 2016. Retour d'expériences sur l'utilisation de tracks synthétiques en Bourgogne – Franche-Comté. INOFOX-Tracks synthétiques. FCBA INFO, janvier 2016, 5 p.

Ulrich E., Pischedda D., Ruch P., Bigot M., Cacot E., Montagny X., George P., Fraichot J., 2015. Onze chantiers test de premières éclaircies feuillues mécanisées : caractéristiques des peuplements, prélèvement et productivité des machines. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 47 pp. 28-35

Werner D., Werner B., 2001. Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens (Tschernosem): Bodenphysikalische, computertomographische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. Journal of Plant Nutrition and Soil Science vol. 164 pp. 79-90

Wilpert K. von, Schäffer J. 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. European Journal of Forest Research vol. 125 pp. 129-138



à suivre

Prochain numéro

À venir, un numéro consacré à la restitution du séminaire ONF d'octobre 2016 sur *La sylviculture à objectif de protection contre les risques naturels dans les forêts domaniales « RTM »*.

Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

Sur intraforêt : depuis toutes les pages d'intraforêt, cliquer sur le lien « Portail biblio » du pavé « Ressources » en colonne de gauche (ou noter, dans la barre d'adresse : <http://biblio.onf.fr>) pour arriver sur la page d'accueil du portail ; en choisissant (pavé de gauche) de faire une recherche « dans une collection ONF », puis en choisissant « Rendez-vous techniques » dans la nouvelle fenêtre, on accède à tous les articles et dossiers au format PDF.

Sur internet : [http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques))

La revue **RenDez-Vous techniques** est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec France nature environnement : « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur ad hoc, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans RDV techniques et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.

**Si vous désirez nous soumettre des articles
prenez contact avec :**

ONF – Département recherche,
développement et innovation
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 47
Courriel : rdvt@onf.fr

