

#77

# RenDez-Vous techniques

**Débarder par câble  
aérien en plaine  
sur sols sensibles**

Hiver 2023

03

## AVANT-PROPOS

Sortir de l'ornière...

04

## ZOOM

Et si le câble aérien offrait des solutions pour la gestion des forêts de plaine ?

Par Didier Pischedda

09

## MÉTHODES

Évaluation de la ressource « chêne à merrain sur sols sensibles » mobilisable par câble aérien

Par Didier Pischedda, Noémie Pousse, Catherine Riond, Eric Martignene, Virginie Le Gal, Martin Delsart

15

## PRATIQUES

Retours d'expérience des chantiers câble aérien 2020 - 2022

Par Didier Pischedda, Mickael Vericel, Aymeric Albert

23

## MÉTHODES

Intérêt de l'exploitation par câble aérien en plaine : analyse économique à l'échelle du cycle sylvicole du chêne

Par Hanitra Rakotoarison, Didier Pischedda, Martin Delsart, Noémie Pousse, Erwin Ulrich

33

## PRATIQUES

Le débardage par câble en plaine, un nouveau

Par Didier Pischedda

36

## CONNAISSANCES

Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés

Par Noémie Pousse, Arnaud Legout, Frédéric Darboux, Jacques Ranger



Cliquer sur un titre pour aller directement à l'article souhaité



En fin d'article, cliquer sur ce bouton pour revenir au sommaire

# Sortir de l'ornière...

**E**n forêt de plaine, les exploitations se font en hiver, hors période de végétation. En hiver, c'est-à-dire sur des sols souvent humides et de plus en plus rarement gelés, en état de fragilité aigüe. Pour éviter les dégradations, les suspensions de chantier de débardage deviennent plus fréquentes ou prolongées, avec des risques de dévalorisation des bois entre autres inconvénients. On sait depuis des années que le câble aérien offre une alternative pertinente au système terrestre habituel, mais ça n'a pas eu beaucoup d'effet jusqu'ici.

Aujourd'hui l'ONF prend les choses à bras-le-corps pour faire en sorte que cette option puisse être mise en oeuvre à bon escient dans les situations qui le justifient.

C'est l'objet de ce numéro des RenDez-Vous techniques, coordonné pour l'essentiel par Didier Pischedda, avec en bonus une première synthèse des observations engrangées depuis plus de 10 ans sur le dispositif expérimental INRAE-ONF « tassement des sols ».

Quelques termes de jargon (marqués *)...	
<b>Affouagiste</b>	Bénéficiaire du droit d'affouage, droit au bois d'usage domestique, en forêt communale
<b>CNPEF</b>	Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière (de l'ONF)
<b>ETF</b>	Entreprise (entrepreneur) de travaux forestiers
<b>Fiche de désignation</b>	Recensement des arbres désignés pour la coupe de telle année dans une UG dûment identifiée, avec leurs caractéristiques (essence, dimension, etc.)
<b>FNEDT</b>	Fédération nationale entrepreneurs des territoires
<b>IPC</b>	Indice de prélèvement câble = volume prélevé par mètre de ligne de câble (m <sup>3</sup> /m)
<b>Plan de câblage</b>	Document synthétique et opérationnel ayant pour but de visualiser l'organisation spatiale d'un ensemble de lignes de câble et de connaître les spécificités techniques, sylvicoles et économiques de chacune des lignes
<b>TCB</b>	(agent) technico-commercial-bois (de l'ONF)
<b>UG</b>	Unité de gestion (= parcelle ou sous-parcelle)
<b>VUM</b>	Volume unitaire moyen (des arbres à débarder)

# Et si le câble aérien offrait des solutions pour la gestion des forêts de plaine ?

**L'exploitation par câble aérien peine à se développer en France, malgré de multiples travaux sur la faisabilité technico-économique et malgré son intérêt pour la gestion forestière durable. Or avec les évolutions climatiques, la question de la sensibilité des sols forestiers est plus cruciale que jamais. Cet article invite à décroquer les esprits, à penser loin... et à s'organiser concrètement avec les parties concernées pour avancer !**

Les réflexions sur les liens entre la sylviculture et le système de mobilisation des bois - en termes d'organisation ou d'interactions - sont assez méconnus. Pourtant ces liens, une fois énoncés, semblent une évidence à laquelle on se doit de prêter attention. Ce sujet a fait l'objet de travaux novateurs dès les années 1980 par le Docteur Ingénieur Cicéron Rotaru du CTBA (aujourd'hui FCBA), notamment par le début d'observations scientifiques des effets de la mobilisation des bois sur le peuplement, le sol, la flore, la faune, l'eau ainsi que l'accueil du public.

*« L'exploitation se trouve dans une position d'équilibre entre les effets des exigences des lois économiques sur les travaux de récolte des bois et les exigences de l'aménagement forestier basé sur l'application de règles scientifiques destinées à assurer l'avenir d'une forêt. Quelle est alors la juste position qu'on peut avoir sur ce problème ? D'abord, reconnaître l'existence d'une interdépendance entre le mode de traitement prévu par l'aménagement de la forêt et la méthode d'exploitation ; en second lieu, définir cette interdépendance. »* (Rotaru, 1984 et 1990)

L'étude des interdépendances a vite fait ressortir les effets sur les sols forestiers, lesquels ont été caractérisés en 1985 par la description des différents phénomènes concernés (scalpage, orniérage, martelage et compactage) et avec quelques premières recommandations d'usage, notamment quand les sols sont très humides ou gorgés d'eau. La conclusion portait déjà une certaine vision de ce sujet :

*« Réduire au maximum possible les préjudices et avoir, en même temps, une productivité convenable est l'apanage d'une science complète de l'exploitation forestière. Il arrive que l'on acquière seulement des connaissances dans le domaine des machines d'exploitation forestière et leurs productivités, ou seulement des connaissances dans le domaine des sols ou de la sylviculture. L'extension de la mécanisation en forêt rend indispensable un enseignement mixte, machine et forêt, si l'on veut pratiquer une foresterie moderne et avec un minimum de risques. »* (Rotaru, 1985)

Ainsi, nous avons besoin de connaître l'ensemble des systèmes d'exploitation pour gérer les forêts au mieux.

## Le câble aérien en France, un système méconnu

Malgré des études depuis les années 1990 sur le câble aérien, force est de constater que nous avons eu tendance à ne réfléchir le long terme de la mobilisation des bois que par le « couple » tracteur/piste, en plaine comme en montagne.

Contrairement aux forestiers suisses ou autrichiens (Ulrich, 2002), le forestier français connaît assez peu le système de débardage par câble aérien. Il est en effet peu évoqué dans les programmes de formation, d'une part, et la probabilité d'avoir affaire à ce type de chantier durant une carrière professionnelle en France est assez faible, d'autre part. Les forestiers de montagne sont évidemment plus au fait de ce système de mobilisation mais là encore il y a de très grandes disparités, notamment du fait que le nombre d'entreprises câblistes dans notre pays est limité.

Alors quand il s'agit de comparer ces deux systèmes de mobilisation (terrestre ou aérien) en plaine, notamment pour des coupes d'amélioration ou de régénération de chêne, le seul élément factuel disponible est le prix de la prestation à l'instant t, avec pour le câble un prix de référence correspondant à des chantiers de montagne. Or le prix du système aérien représente généralement le double de celui du système terrestre classique (bucheronnage manuel et débusquage/débardage au tracteur), ce qui est jugé trop élevé.

Les forestiers et les entreprises locales (ETF\* ou exploitants forestiers) en concluent que les aspects économiques sont trop défavorables et pensent avoir fait le tour du sujet.

La notion d'interaction entre sylviculture et système d'exploitation proposée par C. Rotaru n'est pas passée dans la méthode d'analyse. Cette façon de raisonner a fortement pénalisé la filière câble en France et la différence particulièrement de celle de la Suisse, de l'Autriche ou de l'Italie du Nord.

## Des essais et une bibliographie consistante

Pourtant, ce n'est pas la documentation qui manque sur l'intérêt du système de mobilisation par câble aérien en montagne mais aussi en plaine (voir bibliographie). En effet, les premiers chantier tests de câbles aériens en plaine datent de 2002-2003 dans le cadre de la rédaction du guide PROSOL. Après les tempêtes Lothar et Martin de 1999, suite à l'exploitation des chablis et aux impacts constatés par les forestiers sur de nombreuses parcelles, le ministère de l'Agriculture avait demandé que soient testées, grandeur nature, des alternatives pour moins impacter le sol. Deux systèmes avaient été identifiés : le cheval de fer (petite mécanisation) et le câble aérien (voir le rapport final (Bartoli et al., 2006) et le guide PROSOL (ONF-FCBA, 2009)).

Pour le câble aérien, trois chantiers ont été réalisés avec des forestiers volontaires de l'ONF, des scieurs et des câblistes grâce aux moyens alloués à ce projet : en forêt domaniale de Mormal (59), en FD de Chaux (39), et en FD des Hauts Bois (54) (De Paul, 2005 ; JMF, 2006).

Dans ce cadre exploratoire, les premiers objectifs étaient de :

- démontrer la faisabilité technique (rares étaient ceux qui pensaient cela possible) ;
- évaluer les facteurs de contrainte à la productivité de ce système ;
- définir, si possible vu le peu de chantiers réalisés, quels étaient les critères nécessaires pour assurer une rentabilité économique.

La faisabilité technique a été démontrée. Il n'y a aucun problème technique à débarder par câble aérien à plat. Il faut seulement disposer d'un câble-mât avec 3 câbles (câble porteur, câble de traction et câble de retour) ou d'un chariot automoteur pour travailler à plat car la gravité ne peut pas aider comme en montagne, et avoir la compétence nécessaire pour sa mise en œuvre. Ceci a aussi été démontré dans d'autres pays d'Europe.

Les contraintes techniques limitant la productivité, avec un effet sur le coût de revient et le prix de prestation potentiel, ont aussi été identifiées, au moins en partie, ainsi que quelques critères techniques ou seuils pour assurer une rentabilité économique. Le détail de cette analyse est paru en 2008 dans le n° 19 des RenDez-Vous techniques (dossier sur l'exploitation respectueuse des sols).



↑ La parcelle 5 en FD de Bellême, avant coupes de régénération : un « mur de bois »

© Mickaël Buors / ONF

## Des chantiers de référence en plaine

En vertu de la politique environnementale de l'ONF, définie en 5 axes dont un sur la protection des sols, et en lien avec la sortie du guide PROSOL, l'agence d'Alençon a décidé d'utiliser le câble aérien sur des coupes de régénération En forêt domaniale de Bellême, trois coupes de régénération ont été débardées par câble aérien en 2008, 2011 et 2014, pour être vendues en bois façonnés.

S'agissant d'une parcelle sur sol limoneux très sensible et avec un fort volume sur pied au départ, l'idée était d'exploiter les coupes de régénération au câble pour assurer le renouvellement sans dommage en moitié moins de temps qu'il n'en aurait fallu en système classique. Ainsi le peuplement suivant se met en place plus tôt, et avec des coûts de dégagement réduits ou nuls car les semis s'installent plus facilement et sans concurrence.

Interrogés récemment sur cette opération, les services de l'agence ont évoqué les cinq points de satisfaction suivants.

**Pour le sol, bilan positif.** « Pas de période de suspension de chantier avec ce système. De plus, les impacts sont limités aux lignes de câble sous forme de sillon et non de tassement alors qu'en traditionnel les impacts sont sur une surface 9 à 10 fois plus importante. »

**Pour la durée de la régénération, bilan positif.** « L'objectif initial était de réaliser une régénération sur 6 ans au lieu de 15. En pratique, 8 ans ont été nécessaires car le prélèvement de chaque coupe n'a été que de 150 à 200 m<sup>3</sup>/ha, au lieu de l'objectif de 200 m<sup>3</sup>/ha (probablement par crainte habituelle d'un volume à exploiter trop important) ». La récolte prévue en trois coupes en a donc finalement nécessité quatre, la dernière représentant un volume trop faible pour une exploitation au câble, mais sans perdre de vue l'intention de départ. Le gain financier lié à une régénération plus rapide fait partie du calcul économique sur une rotation complète (Rakotoarison et al., même numéro).



© Didier Pischédra, ONF

© Didier Pischédra / ONF

↑ Bellême p5 : coupe d'ensemencement 2008 – Câbliste Alain Rikénbah

**Pour la qualité de la régénération, bilan positif.** « L'évolution de la parcelle confirme que la régénération s'est développée sans problème, même si l'exploitation de la futaie a été plus rapide qu'en mode traditionnel. Il aurait été intéressant de dresser un bilan technique 5-6 ans plus tard, en comparant cette parcelle (5) avec la parcelle voisine (3) qui a été ouverte en même temps, sous un mode traditionnel. La comparaison aurait pu porter sur la qualité de la régénération (hauteur et densité des semis), l'ITTS (nombre de dégagements, etc.), la différence éventuelle de flore au sol (joncs...) et les coûts évités pour combattre une végétation concurrente. Cette analyse n'a malheureusement pas été réalisée. Toutefois de l'avis des personnels de terrain, cette régénération est totalement réussie et très homogène ». Ces coûts évités sont pris en compte dans l'analyse économique de long terme (Rakotoarison et al., même numéro).

**Organisation des chantiers :** « Le débusquage des bois au tracteur jusqu'à la ligne de câble peut s'avérer une très bonne solution. Le tracteur circulant à vide n'impacte pas les cloisonnements. Ce « surcoût » est compensé par une hausse importante de la productivité du câble. Ainsi, sur une des lignes, le câble a sorti pratiquement 200 m<sup>3</sup>/jour à la suite du rassemblement des grumes sous la ligne. »

**Commercialisation des bois :** « Aujourd'hui, nous maîtrisons beaucoup mieux les découpes « merrains », ainsi les bois seraient préparés différemment et mieux découpés pour les pièces les plus lourdes ce qui a été un reproche à l'époque. Des contrats 'rendu usine' simplifieraient la tâche des services bois avec une meilleure organisation des flux des bois. Ainsi des gains de reprises auraient été possibles. Enfin, une coupe de ce type serait mieux perçue par les clients aujourd'hui. Les mentalités ont évolué avec le développement des contrats d'approvisionnement. »

Plusieurs chantiers ont aussi été réalisés ailleurs avec succès sur des zones humides ou des tourbières, notamment en Auvergne ou en Bourgogne (Durllet et al., 2011), et jusque dans les [Landes de Gascogne](#) en 2019 mais ils sont encore peu fréquents.

## Un nouvel intérêt

Aujourd'hui, les effets du changement climatique contribuent à relancer l'intérêt de l'utilisation du câble aérien en plaine, et notamment pour mobiliser des grumes de chêne à merrains sur sols sensibles. En effet, l'exploitation des feuillus se fait classiquement en période de repos végétatif, c'est-à-dire l'hiver (octobre à mars), notamment car l'abattage est plus simple hors feuille. Or il est possible de constater sur les dernières années que la pluviométrie hivernale est en hausse, ce qui rend les sols impraticables et entraîne des suspensions de chantier (cf. recommandations du guide [PRATIC'SOLS](#), reprises dans le [CNPEF](#) - Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière). Par ailleurs, non seulement il pleut plus qu'avant mais il pleut aussi souvent plus longtemps ce qui allonge d'autant les périodes de suspension.

Les bois tardent ainsi à être débardés jusqu'aux places de dépôt. Ils ne sont donc pas amenés à temps sur des parcs de ventes (vente de bois façonnés en bloc) ou chez les transformateurs (via des contrats d'approvisionnement). Quand il s'agit de bois d'œuvre de qualité, les répercussions financières peuvent être très importantes car les prix de vente baissent au printemps (voir Pischédra et al., même numéro). De plus, si les bois abattus restent sur coupe pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois des phénomènes de dégradation de leur qualité peuvent aggraver les pertes économiques (piques d'insectes notamment, voire dégradations causées par des champignons).

© Jean-Luc Chagnon, ONF



© Jean-Luc Chagnon, ONF

↑ Bellême p5 : deuxième secondaire 2013 – Câbliste UP câble ONF

Ainsi, la mise en œuvre d'une sylviculture exigeante de long terme, parfois jusqu'à 200 ans, peut être dévalorisée lors des coupes de régénération par l'inadaptation du système de mobilisation terrestre causée par cette nouvelle situation climatique. Il est donc important de réfléchir aux alternatives techniques et aussi de bien mettre en relation les coûts d'exploitation supplémentaires avec les pertes économiques potentielles. Le résultat de ces analyses est souvent surprenant, quelle que soit l'échelle de temps à laquelle on se réfère (voir les articles suivants, même numéro).

## En Europe aussi, le câble intéresse

Les forestiers français ne sont pas les seuls à se pencher sur ce système de mobilisation pour la plaine. Erber et Spinelli ont réalisé en 2019 une enquête auprès de tous les fabricants de câbles aériens européens quant à l'utilisation de leurs matériels sur terrains plats ou mouilleux. Presque tous ont eu des demandes d'information à ce sujet, venant principalement d'Allemagne (31%) mais aussi de Russie (14 %), d'Italie (10%), puis de France (7%) à égalité avec l'Autriche et la Biélorussie.

Les auteurs citent trois raisons principales, au vu des études réalisées ces dernières années :

- l'augmentation de la conscience environnementale concernant, notamment, la nécessaire protection des sols (Abbas et al. 2018) ;
- les effets du réchauffement climatique qui font baisser la durée des périodes de gel hivernal des sols forestiers dans le nord de l'Europe et qui ont un effet direct sur les possibilités de mobilisation du bois (Mohtashami et al. 2017) ;
- l'augmentation de la taille et de la masse des porteurs (pour une productivité accrue) qui, malgré une pression au sol assez stable en moyenne dans le temps (avec toutefois de grandes disparités selon les constructeurs), a des impacts sur le sol. (Nordfjell et al. 2019).

Cette enquête donne aussi une liste des pistes d'adaptation pour améliorer l'utilisation du câble aérien en plaine. Par exemple, disposer de mâts plus hauts, d'ancrages artificiels plus simples à monter, de systèmes automatiques pour le regroupement des tiges, ou même imaginer un système artificiel de pylône sans hauban et facilement déplaçable.

Les auteurs citent d'ailleurs deux publications françaises sur le fait que le travail en plaine permettrait d'améliorer le taux d'activité des entreprises câblistes, qui sont situées en montagne et sont obligées de s'arrêter en hiver (Silande 1999, Grulois 2007). Or un taux d'activité qui augmente permet d'amortir les machines sur un plus grand nombre de mois dans l'année, avec comme conséquence directe la baisse du coût de revient, le « fameux » surcoût.

## Un « Plan câble » pour la gestion durable des forêts

De son côté, l'ONF a signé fin 2019 un plan d'action pour le débardage par câble aérien avec la FNEDT\* comportant une trentaine d'actions regroupées en 6 thématiques :

- Politique forestière (visites de chantiers, échanges avec les ministères et les parlementaires, rencontres-débats avec les fédérations professionnelles nationales...)
- Accompagnement des entreprises
- Contractualisation et amélioration des chantiers (localisation des volumes de bois à forte valeur...)
- Recherche-développement-innovation (développement d'outils d'aide à l'expertise avec les instituts FCBA et IRSTEA/INRAE...)
- Formation
- Communication (vidéos et brochures promotionnelles, plans média...)

Cette année (août 2022) l'ONF a lancé un marché national câble en plaine à la suite de l'évaluation de ses propres besoins (lesquels sont en forte hausse) et du contexte professionnel (le nombre de câblistes est malheureusement en baisse). C'est pourquoi il est apparu particulièrement opportun de faire un retour un peu approfondi sur les enjeux du câble aérien en plaine et les analyses technico-économiques récentes conduites à l'ONF à l'appui d'une action volontariste dans ce domaine.

Le présent article sert d'introduction à la présentation de ces travaux (pp. 9 à 32), qui portent sur l'évaluation de la ressource « chêne à merrain sur sols sensibles », sur le retour d'expérience de chantiers récents, et sur une analyse économique de la sylviculture du chêne selon les systèmes d'exploitation.

**Didier Pischedda**

ONF-DCBS, expert national exploitation forestière

## RÉFÉRENCES

### BIBLIOGRAPHIE SUR LE CÂBLE AÉRIEN

#### Par ordre chronologique

- Pischedda D., 1998. Les techniques de câblage : Outils pour la gestion durable des forêts de montagne. 10 fiches pédagogiques ; CTBA - Lycée agricole privé de Poisy
- Pischedda D., 1999. Le câble : un outil pour la gestion durable des forêts de montagne - CTBA info, n° 79, pp. 5-7
- Ulrich E., 2002. En Autriche, un défi écologique pour la gestion durable des sols forestiers : l'exploitation par câble dans toutes les conditions topographiques. La Forêt Privée, 265, pp. 18-27
- Rouchon R., Chagnon J.-L., Bartoli M., 2005. Un câble dans... une peupleraie savoyarde. Le journal de la Mécanisation Forestière, n° 49, p. 17.
- Bartoli M., Pischedda D., Chagnon J.-L., 2006. Pour une exploitation respectueuse des sols. Chantiers de démonstration ; rapport final. DGFAR, ONF, CTBA. 75 p. + annexes
- Pischedda et al., 2008. Dossier : Exploitation respectueuse des sols. RenDez-Vous techniques de l'ONF n° 19, pp. 23-54
  - [Positionnement de l'ONF pour une exploitation respectueuse des sols (J.-M. Mourey)]
  - [Observatoire des impacts de l'exploitation forestière (E. Cacot)]
  - [Organisation des chantiers d'exploitation forestière « traditionnels » (E. Cacot)]
  - Des systèmes complémentaires existent (D. Pischedda, M. Bartoli, J.-L. Chagnon)
  - Analyse économique des coûts d'exploitation d'un chantier (M. Bruciamacchie, S. Costa, L. Ibanez)
  - Évolution des systèmes de mobilisation et protection du sol (D. Pischedda)
- Pischedda D., Descroix L., Fay J., Magaud P., 2012. Mobiliser du bois en montagne : le défi du câble aérien. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 35, pp. 54-57
- Fay J., Descroix L., Magaud P., Pischedda D., 2012. Simulcable : un logiciel d'optimisation pour l'implantation des lignes de câble aérien - Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 35, pp. 58-61
- Pischedda D., 2016. Utilisation du câble en forêt : une histoire internationale. Histoire et traditions forestières : 5e colloque Histrfor. - Coll. Les Dossiers forestiers, n° 30, pp. 39-76
- Pischedda D., Helou T.E., 2019. Le débardage par câble arien. Une solution pour la gestion durable des forêts. Guide ONF – FNEDT, 18 p.
- Magaud P. et al., 2020. Débardage par câble aérien : guide technique (projet Interreg franco-suisse : FORMICABLE). Grenoble : FCBA ; ACSR ; Pole excellence bois Pays de Savoie ; ISETA ; Communes forestières Auvergne-Rhône-Alpes ; GEIQ Pays de Savoie. [Tome 1](#), Le câble du point de vue des propriétaires et gestionnaires, 103 p. [Tome 2](#), Le câble du point de vue des entreprises câblistes, 239 p.

### AUTRES RÉFÉRENCES

- Abbas D., Di Fulvio F., Spinelli R., 2018. European and United States perspectives on forest operations in environmentally sensitive areas. Scandinavian Journal of Forest Research vol. 33(2) pp. 188-201
- Bartoli M., Pischedda D., Chagnon J.L., 2006. Pour une exploitation forestière respectueuse des sols. Chantiers de démonstration. Rapport final. DGFAR, ONF-CTBA 75 p. + annexes
- De Paul M.A., 2005. Quand le téléphérage s'installe en plaine, Forêt Wallonne n° 76, pp. 16-22
- Durllet P., Zakin C. & Bardet O., 2011. Exploitation d'épicéas, à plat, sur sols tourbeux : essai de débardage par câble mât en Morvan. Revue scientifique Bourgogne-Nature - Hors-série 9, pp. 14-22
- Erber G., Spinelli R., 2020. Timber extraction by cable yarding on flat and wet terrain : a survey of cable yarder manufacturer's experience. Silva Fennica vol. 54 (2), article id 10211. 19 p.
- Grulois S., 2007. Cable-yarding in France : past, present and perspective. DEFOR Project Report - Task 1.1 - INTERREG IIIB SUDOE. 5 p.
- JMF (anonyme), 2006. Débardage et zones sensibles : le câble fait ses preuves. Le Journal de la mécanisation forestière n° 60 pp. 12-14
- Mohtashami S., Eliasson L., Jansson G., Sonesson J., 2017. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden. Silva Fennica 51(5) article 2018. 14 p.
- Nordfjell T., Öhman E., Lindgross O., Ager B., 2019. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. International Journal of Forest Engineering vol. 30(1) pp. 1-13
- ONF-FCBA, 2009. Guide Pratique : Pour une exploitation respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL ». 110 p.
- Rotaru C., 1984 et 1990. Les Interactions entre les méthodes d'exploitation et la sylviculture. Paris : Centre technique du bois, C.E.F.S., n° 2 48 p.
- Rotaru C., 1985. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. Revue forestière française vol. 37 (5), pp.359-370.
- Silande G., 1999. Le débardage par câble en France. Situation actuelle et perspectives. [Cable yarding in France. Current situation and perspectives]. Mémoire de fin d'étude. ENGREF. 80 p.
- Ulrich E., 2002. En Autriche, un défi écologique pour la gestion durable des sols forestiers : l'exploitation par câble dans toutes les conditions topographiques. La Forêt Privée, n° 265, pp. 18-27



# Évaluation de la ressource « chêne à merrain sur sols sensibles » mobilisable par câble aérien

**L'exploitation par câble aérien des coupes de bois de grande qualité sur sol sensible est particulièrement pertinente à tous points de vue, mais difficile à mettre en pratique faute d'un marché bien installé sur ce type d'activité. D'où la nécessité de se doter d'une méthode pour identifier en continu le portefeuille de coupes relevant de cette logique, pour donner de la visibilité aux entreprises dans le cadre d'une initiative nationale.**

Le développement du câble aérien en contexte de plaine présente un intérêt fort dans le cas des exploitations sur sols sensibles, en particulier lorsqu'il s'agit de mobiliser des bois de belle qualité. Les peuplements de chêne susceptibles de produire du bois à merrain relèvent largement de cette problématique, d'autant qu'ils représentent un produit majeur de la sylviculture en forêt domaniale et une part non négligeable de nos recettes de vente de bois.

Le propos est ici de cerner le marché potentiel pour le câble aérien en plaine, et donc d'identifier la ressource disponible. Il a fallu pour cela mettre au point une méthodologie à partir des bases de données de notre système d'information, de façon qu'elle soit reproductible d'une année à l'autre, à mesure des nouveaux programmes de coupes. L'identification des parcelles de chêne à merrain potentiellement impraticables l'hiver servira ensuite à prioriser avec les services locaux les interventions des entreprises câblistes sur le territoire via un marché national.

Pour construire cette méthodologie, il convenait au préalable de disposer d'informations sur :

- l'état d'assiette des coupes (c'est-à-dire le programme des coupes + données afférentes) et la qualité des chênes sur pied ;
- la sensibilité du sol à la circulation des engins terrestres ;
- les informations géographiques associées à ces données ;
- les variations de prix des bois concernés selon les dates des ventes sur les dernières années (pour appréhender la justification économique).

Il fallait aussi mobiliser les compétences de plusieurs services spécialisés de l'ONF, relevant de trois directions centrales distinctes. Un groupe de travail transversal a été constitué à cette fin début 2021 avec des spécialistes du département Commercial Bois, du réseau Recherche-Développement-Innovation et du pôle national Système d'Information Géographique.

Ce groupe a réalisé le travail en 5 phases :

1. Identifier les unités de gestion (UG) productrices de chêne à merrain (d'après les états d'assiette 2018-2021) ;
2. Déterminer les critères disponibles pour évaluer la sensibilité des sols ;
3. Fixer les seuils de ces critères pour identifier les UG à merrain avec des contraintes de mobilisation ;
4. Identifier les volumes concernés sur ces UG potentiellement à risque ;
5. Évaluer les pertes potentielles de chiffre d'affaires sur ces UG potentiellement à risque.

Le présent article expose les principes de la méthodologie, les limites actuelles mais aussi les actions opérationnelles qui en découlent pour les territoires et entreprises concernés.

## Identifier les zones productrices de chêne à merrain

Le premier travail a été de recenser à l'échelle nationale, via la base de données PRODBOIS, toutes les fiches de désignation\* (et leur déclinaison commerciale en « fiches bois ») présentant des chênes, avec une proportion de merrain supposée importante.

Les critères utilisés pour extraire les informations nécessaires des Fiches de désignation principales (FDP) 2018 – 2021 étaient :

- Traitement en futaie régulière, en conversion et irrégulier
- Composition : pur chêne ou en mélange
- Type de coupe : toutes les coupes d'amélioration susceptibles de comporter du bois d'œuvre (codes indiquant une certaine maturité), les coupes de régénération, les coupes irrégulières à bois d'œuvre
- Calibre du peuplement : Gros Bois
- Capital sur pied, intensité de prélèvement : capital type 2 (peuplement proche du capital cible ⇔ prélèvement léger) et type 3 (peuplement au-dessus du capital cible ⇔ prélèvement fort)

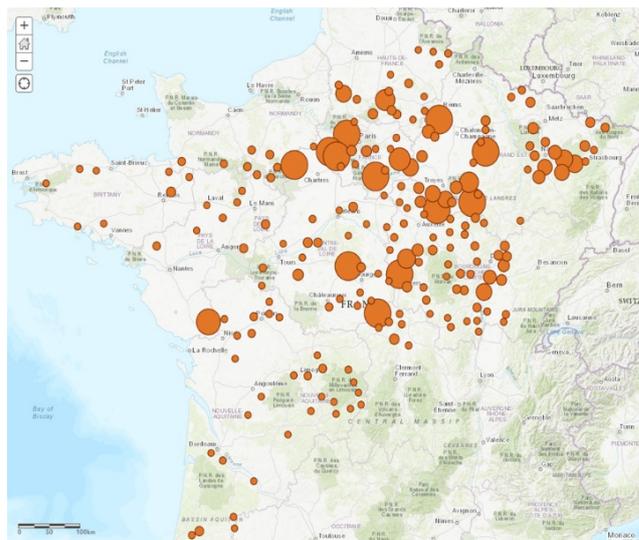
L'information sur la qualité des bois n'étant pas systématiquement renseignée dans les fiches de désignation, il est probable que les critères utilisés ne sont pas assez sélectifs par rapport aux UG à merrain (il a fallu se contenter de la notion de bois d'œuvre et/ou indication de diamètre). Le nombre des UG sélectionnées correspond donc à une fourchette haute des UG avec chêne à merrain. Enfin nous avons établi la correspondance entre identifiants des fiches de désignation et ceux du référentiel des forêts (RDF) pour obtenir leur localisation géographique.

À partir de l'état d'assiette des coupes des années 2018-2021, nous avons ainsi identifié sur l'ensemble du territoire national **13 458 UG à chêne susceptibles de contenir du bois à merrain** (Fig. 1). Cependant la Franche-Comté n'a pas pu être prise en compte car le système de codification du critère de composition utilisé dans cette région jusqu'en 2021 ne permettait pas de pointer les peuplements composés majoritairement de chêne. Ce handicap a été corrigé à partir de 2022, ce qui permettra désormais de réitérer ce type d'analyse sur une base complète.

## Caractériser les zones « à risque » de retard de mobilisation et les volumes concernés

Les objectifs des deux étapes suivantes étaient de rechercher, avec les données immédiatement disponibles, les meilleurs critères possibles pour appréhender la sensibilité des sols, puis de déterminer les seuils « de risque » permettant d'identifier les UG dans lesquelles la sensibilité des sols peut entraîner des retards de mobilisation.

Nous savons que la sensibilité des sols forestiers au tassement est caractérisée par la texture et le taux d'humidité (cf. guides PROSOL - 2009 et PRATIC'SOLS - 2017). Les



↑ **Figure 1.** Localisation des UG à chêne susceptibles de contenir du bois à merrain.  
La grosseur du cercle varie avec le nombre d'UG.

chênes à merrain se trouvent généralement sur des sols limoneux assez profonds donc avec une sensibilité potentielle forte. Malheureusement, le critère de texture des sols (ou la station forestière qui est aussi une possibilité de caractérisation) n'a pas pu être retenu. En effet, nous ne disposons pas encore d'harmonisation nationale sur le critère de sensibilité potentielle des sols forestiers ou de base de données permettant une analyse sur tout le territoire. Cependant des travaux sont en cours en Directions Territoriales via le déploiement d'outils de diagnostic comme ForEval ou la saisie informatique et l'harmonisation des cartographies des stations forestières. Ces informations seront donc intégrées dès que ces travaux seront disponibles.

À défaut, il a été décidé d'approcher le sujet par l'humidité des cloisonnements dédiés à la circulation des engins et donc par la pluviométrie, via les données de Météo France spatialisées par l'équipe de recherche SILVA (INRAE – AgroParisTech – Université de Lorraine) et mises à disposition sur le portail [SILVAE](#). La période de référence a été choisie sur les 6 dernières années (2013-2019) et non sur les données climatiques moyennes, pour intégrer les premiers effets du changement climatique (celles de 2020 n'étaient pas encore disponibles au moment de cette réflexion).

La mobilisation des chênes se fait majoritairement sur la période d'octobre à mars, ce sont donc les **données de pluviométrie de ces 6 mois d'hiver** qui ont été utilisées. Il a ensuite été nécessaire de définir sur cette période des indicateurs climatiques pertinents pour notre propos, assortis de seuils au-delà desquels on considère qu'il y a un risque sérieux que les cloisonnements soient impraticables.

Deux indicateurs ont été retenus :

- la hauteur des précipitations mensuelles pour prendre en compte l'humidité probable des sols à une date donnée, à l'échelle d'un chantier ;
- le cumul des précipitations sur la période automnale et hivernale, pour évaluer la répétition du phénomène.

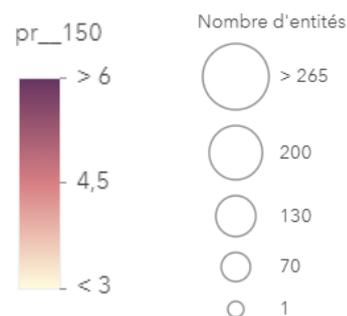
## MÉTHODES

Pour trouver un seuil adéquat, des discussions à dire d'expert ont été nécessaires : quantité d'eau de pluie par rapport aux capacités de drainage des sols, compromis pour éviter un excès dans un sens ou dans l'autre (seuil trop haut ou trop bas), qui aboutirait à un résultat inutilisable.

Ainsi pour la hauteur de **précipitations mensuelles** nous avons choisi un seuil de **150 mm, pour au moins 3 mois sur les 36 considérés (octobre à mars, de 2013 à 2019)**. En effet, un sol recevant plus de 150 mm en un mois mettra du temps à se ressuyer, ce qui entrainera des suspensions de chantier très probables. Pour le **cumul de précipitations**

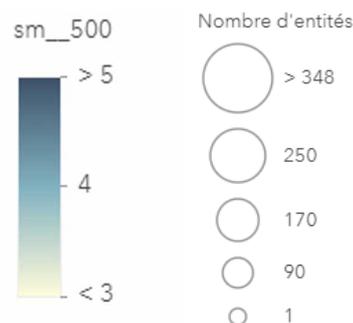
sur la période de référence, c'est le seuil de **500 mm pour au moins 3 saisons sur les 6 considérées** qui a été fixé, car un sol recevant plus de 500 mm en 6 mois sera souvent impraticable sur cette période.

En croisant ces deux critères (cumulés) pour les précipitations avec les données géographiques des UG à merrain, il ressort que **1 314 UG sont à risques, soit 10 % des UG recensées** (Fig. 2 et 3). Rappelons que cette approche du risque ne tient pas compte à ce jour de la sensibilité intrinsèque du sol faute de données homogènes à l'échelle nationale.



← **Figure 2.** Localisation des UG chêne à potentiel merrain estimées à risque suivant le Critère 1: + de 3 mois avec + de 150 mm, sur la période octobre à mars, de 2013 à 2019.

La grosseur du cercle varie avec le nombre d'UG.



← **Figure 3.** Localisation des UG chêne à potentiel merrain estimées à risque suivant le Critère 2: + de 3 saisons sur 6 avec un cumul > 500 mm.

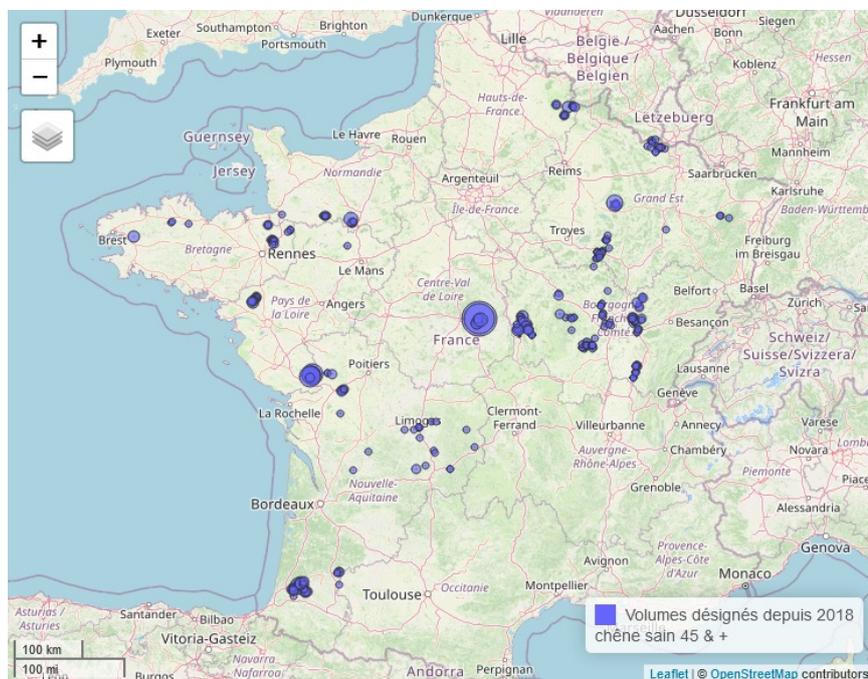
La grosseur du cercle varie avec le nombre d'UG.

La quatrième étape a consisté à quantifier le volume des chênes à potentiel merrain sur ces UG identifiées à risques pluviométriques (Fig. 4).

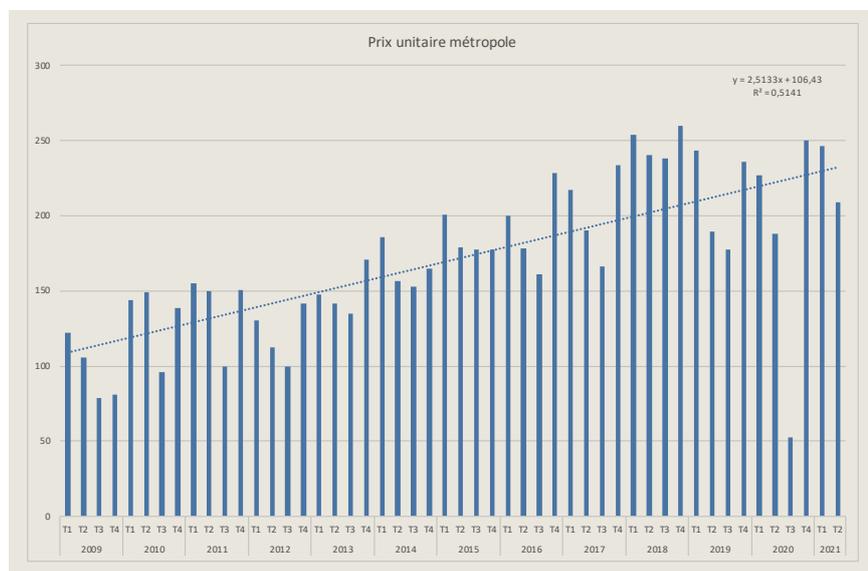
Une analyse des FDP de ces UG sur la période 2018 – 2021 a montré que les chênes de diamètre 45 cm et plus représentent :

- **49 392 m<sup>3</sup> sur pied** ou
- **29 770 m<sup>3</sup> de bois d'œuvre** (volume bois d'œuvre présumé calculé à partir d'une mercuriale de conversion entre le bois sur pied et le volume correspondant de produits en bois façonné).

Ces volumes peuvent faire l'objet d'une cartographie à échelle variable (zoom) selon l'information recherchée (Fig. 4).



← **Figure 4.** Répartition des volumes désignés de chêne à merrain avec contraintes de mobilisation (UG identifiées à risque pluviométrique). La grosseur du cercle varie avec le volume.



← **Figure 5.** Prix moyen de vente du chêne selon les trimestres.

Ainsi, des bois qui n'ont pas pu être vendus en fin ou en début d'année (T4 ou T1) risquent une dévalorisation de 10 à 15 % de leur prix. Vu la valeur de ces bois, le montant de cette perte potentielle n'est donc pas négligeable.

Les économistes du groupe ont travaillé sur la perte de valeur à l'aide de leur modèle (optiBF) en analysant la baisse de prix selon les dates de ventes sous ses deux aspects : l'effet de la date de vente en elle-même mais aussi celui de la baisse potentielle de qualité des bois. Trois hypothèses de dégradation (ou pas) des qualités ont été formulées pour cela : 0, 15 ou 20 % du volume régresse d'une classe (Tab. 1).

En termes de produit, cela veut dire que du bois à merrain peut passer à la qualité charpente. Mais, dans la réalité, cela peut même descendre à des qualités inférieures comme la traverse ou le coffrage.

Rappelons qu'en l'état actuel des données disponibles à l'échelle nationale, cette approche ne tient pas compte de la sensibilité intrinsèque des sols. Nous estimons donc que la perte simulée de chiffre d'affaires (CA) caractérise en fait une fourchette basse. Il est déjà arrivé que la perte de CA sur quelques ventes se chiffre en millions d'euros.

Par ailleurs, les risques d'invendus ne sont pas pris en compte car relativement faibles à ce jour pour ce type de qualité.

## Discussion vis-à-vis du système câble en plaine

Dans cette étude, les volumes de chêne à merrain ont été la clé d'entrée vu leur valeur unitaire. Toutefois sur les UG concernées se trouvent évidemment d'autres qualités de chêne et d'autres essences qui seront bien sorties en même temps que les volumes estimés ici. Le volume total à débarker est donc plus élevé en réalité.

Nous n'avons pas non plus évalué ici la perte de capital à long terme liée au tassement pour les peuplements en question. Les préoccupations de long terme font l'objet de l'analyse économique proposée dans un article distinct (Rakotoarison et al., même numéro).

Dans cette première approche, les montants estimés de perte de CA ne sont pas négligeables, alors même que la méthode les minimise par construction. Ils sont à mettre en regard des coûts supplémentaires liés au système de débardage par câble par rapport au système traditionnel.

Par ailleurs les 29 770 m<sup>3</sup> de bois façonnés estimés, soit un flux de l'ordre de 7 250 m<sup>3</sup> par an, représentent l'activité de deux entreprises câblistes à temps plein en période hivernale. Toutefois, ces chantiers possibles étant répartis sur tout le territoire (voir figure 4), il faudra les regrouper pour limiter les frais de transferts de matériel et par conséquent faire appel à plus d'entreprises pour s'assurer de

Coefficient de détérioration des qualités	Année de vente	CA estimé Vente immédiate* [T4 (année n - 1) ; T1]	CA estimé Vente retardée** [T2 ; T3]	Perte CA	Perte cumulée sur les 4 années
0%	2019	2 352 681 €	2 277 401 €	75 281 €	293 263 €
0%	2020	1 791 494 €	1 698 536 €	92 958 €	
0%	2021	1 440 485 €	1 394 182 €	46 303 €	
0%	2022	2 100 789 €	2 022 068 €	78 721 €	
15%	2019	2 352 681 €	2 174 908 €	177 773 €	551 573 €
15%	2020	1 791 494 €	1 661 787 €	129 707 €	
15%	2021	1 440 485 €	1 323 337 €	117 147 €	
15%	2022	2 100 789 €	1 973 843 €	126 946 €	
20%	2019	2 352 681 €	2 151 834 €	200 847 €	682 024 €
20%	2020	1 791 494 €	1 657 501 €	133 993 €	
20%	2021	1 440 485 €	1 280 100 €	160 385 €	
20%	2022	2 100 789 €	1 913 990 €	186 799 €	

\* les bois peuvent être débarkés à temps pour la vente d'automne-hiver

\*\* le débardage (terrestre) doit être différé pour cause de pluviosité excessive (protection des sols)

↑ **Tableau 1.** Comparaison du chiffre d'affaires simulé des ventes de chêne à merrain « à risque » selon la période de vente et selon l'hypothèse de détérioration (ou non) en cas de débardage différé.

pouvoir mobiliser ces bois. Sachant que le nombre de câblistes est en régression, cette méthode permet de mieux visualiser les enjeux économiques auxquels l'ONF va devoir faire face, en tant que gestionnaire forestier, vis-à-vis des entreprises câblistes et de leurs activités potentielles en plaine mais aussi pour garantir l'approvisionnement en bois de qualité vers la filière de la première transformation.

## Perspectives

Les données de notre système d'information (application PRODBOIS notamment) permettent bien une première approche, basée sur des simulations, de la ressource de plaine mobilisable par câble aérien. La démarche mérite d'être affinée mais permet d'ores et déjà d'identifier les secteurs où se concentrent les UG productrices de chêne de grande valeur et les volumes correspondants, pour passer ensuite à une phase opérationnelle de planification et d'organisation avec les services locaux en agence.

La qualité des estimations de la ressource mobilisable par câble en plaine va s'améliorer avec l'intégration des données de sensibilité intrinsèque des sols en plus des critères climatiques actuels, et avec le perfectionnement de la méthodologie que nous avons adoptée. D'ailleurs, des chantiers au câble aérien sur sols sensibles ont déjà été réalisés (cf. article Retours d'expérience, même numéro) alors qu'ils ne figurent pas dans la liste d'UG « à risque » au sens de notre approche météorologique. Cela témoigne de ce que certains services en agence sont déjà ouverts à la possibilité d'utiliser le câble aérien sur leurs parcelles à sols sensibles.

Par ailleurs, des chantiers à enjeux environnementaux sont aussi proposés dans différentes régions (restauration en milieu humide, protection du patrimoine...). Ce type de chantier vient augmenter le volume potentiel d'activité pour ce système de mobilisation et pour les câblistes.

Les résultats concrets de notre approche de la ressource ont permis de prendre la décision en août 2022 de lancer un marché national pluriannuel « câble en plaine » dès la saison d'exploitation 2022-2023. Nous espérons ainsi donner de la visibilité aux câblistes sur cette activité hivernale pour leur permettre de se développer et de conserver une compétence plus que jamais nécessaire à la gestion durable des peuplements sur sols sensibles et à la résilience des forêts face au changement climatique.

Ce marché a aussi été conçu de façon à pouvoir gérer la disponibilité des câblistes avec la désignation d'une personne spécifiquement chargée de piloter cette activité au niveau national. D'autre part, il permet aussi de faire, à la demande des services en agence, des chantiers ponctuels ailleurs qu'en plaine, c'est-à-dire dans les zones de montagne où l'on n'a pas encore l'habitude du câble. Une adresse électronique a été créée à cet effet pour toute demande de renseignement.

**Didier Pischedda<sup>1</sup>, Noémie Pousse<sup>2</sup>, Catherine Riond<sup>2</sup>, Eric Martignone<sup>3</sup>, Virginie Le Gal<sup>4</sup>, Martin Delsart<sup>5</sup>**

1. ONF-DCBS, expert national exploitation forestière

2. ONF-DT AURA, pôle RDI Chambéry

3. ONF-DCBS, mission bois façonnés

4. ONF-DSI, département solutions métiers et géospatiales

5. ONF-DT SEINO, pôle RDI Fontainebleau



© ONF

↑ Utilisation du câble-mât sur un chantier de restauration de milieu humide.



# Retours d'expérience des chantiers câble aérien 2020 -2022

**Depuis 2020, plusieurs chantiers de plaine à fort enjeu ont pu être réalisés par câble-mât en dépit (ou à cause) de circonstances exceptionnelles. Le retour d'expérience qui en ressort est consistant et d'un grand intérêt pour la conception d'un marché national et le développement de l'expertise câble à l'ONF.**

En février 2020, deux chantiers de débardage par câble aérien en plaine ont été lancés en Ille-et-Vilaine et Loire Atlantique après le constat que plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de bois façonnés n'étaient pas débardables par tracteur. Les sols étaient restés gorgés d'eau à la suite de précipitations records de la fin 2019 (+ de 500 mm par endroit), et les chantiers forestiers avaient dû être suspendus pour protéger les sols. Or les bois, abattus avant les pluies, étaient de très haute qualité. Et comme le temps de ressuyage pouvait encore être long, les risques de dépréciation étaient très importants. L'alerte a donc été lancée début mars pour expertiser les parcelles en question du point de vue de la faisabilité technique d'une part et pour trouver des câblistes capables de faire ces interventions dans un délai le plus restreint possible d'autre part.

L'exercice n'a pas été pas facile, d'autant que la France entrait en confinement pour cause de pandémie Covid, mais il a été mené avec succès grâce à une très forte implication interne et à l'intervention de trois entreprises qui se sont regroupées pour réaliser [ces chantiers](#).

Depuis 2020, d'autres chantiers câble en plaine ont pu être réalisés. Cet article essaye de faire un premier retour d'expérience sur ces chantiers à la fois d'un point de vue organisationnel, technique et économique.

Ce retour d'expériences sera à étoffer, car le nombre de chantiers est encore limité, mais il permet déjà de présenter quelques pistes d'amélioration. Les chantiers à venir permettront d'affiner ces points et nous avons demandé aux titulaires du tout nouveau marché câble national de renseigner des journaux de bord qui permettront aux gestionnaires forestiers et aux entreprises de mieux connaître et comprendre les caractéristiques de ces chantiers, très différents des chantiers historiques de montagne.

## Retour d'expérience organisationnel

### La gestion de la pose de la ligne

Quand il existe des cloisonnements d'exploitation espacés de 18-20 m, le choix de la mobilisation par câble aérien permet au câble de récupérer les bois sur 2 « bandes » à droite et à gauche de la ligne sauf si la densité est très forte ou si l'indice de prélèvement câble (IPC\*) est élevé. Donc on utilise généralement 1 cloisonnement sur 4 en coupe d'amélioration voire 1 sur 5 en coupe de régénération. Après expertise du chantier, ces dispositions sont indiquées dans un « plan de câblage\* » qui tient compte de la disponibilité des ancrages machine et des arbres supports (sur la ligne ou en fin de ligne) pour permettre la mobilisation des arbres désignés.

Premier impératif : une ligne de câble devant être parfaitement rectiligne, le cloisonnement utilisé doit aussi l'être. En cas contraire, soit les arbres gênants devront être abattus, soit il faudra choisir un autre cloisonnement rectiligne. Ce genre de situation doit donc être analysé avant l'arrivée du câbliste

Dans le cas du chantier réalisé en 2022 en forêt domaniale (FD) de Vincence pour une coupe d'amélioration, certaines lignes ont dû être ouvertes tous les 80 m environ faute de cloisonnement existant. La largeur effective de ces couloirs est très limitée (2 à 3 m maximum).



©Didier Pischedda - ONF

↑ Coupe d'amélioration avec ouverture des lignes - FD de Vincence

## La gestion de l'abattage

L'abattage directionnel des arbres vers les lignes de câble est un autre impératif, non seulement pour réduire les blessures aux arbres debout lors du débusquage vers la ligne mais aussi pour réduire le temps de débusquage. Il s'agit d'éviter les allers-retours et les manipulations d'élingage et de désélingage que nécessitent les bois mal orientés : ces opérations influencent aussi la productivité et augmentent donc le coût de revient.

En général la gestion de l'abattage se fait par le câbliste lui-même sous condition d'effectif plein, soit 4 opérateurs, charge à lui de s'organiser comme il l'entend : abattage préalable à la venue du câble ou en simultané (abattage d'une ligne pendant que le débardage se fait sur une autre). Si la densité du prélèvement est forte, il est préférable de laisser le câbliste gérer l'abattage et dans quel ordre le faire pour éviter un trop fort encombrement au sol qui pourrait rendre difficile le débusquage des tiges jusqu'à la ligne. Dans tous les cas, l'objectif est de ne pas devoir mettre le câble-mât à l'arrêt et d'optimiser l'emploi des salariés.

Il peut arriver que la gestion de l'abattage soit réalisée par une autre entreprise, avant intervention du câbliste. Ce cas particulier peut se produire dans les situations suivantes :

- l'effectif en personnel est réduit chez l'ETF\* câbliste ;
  - le prélèvement est assez faible en nombre de tiges/ha (cas des coupes de régénération) ;
  - les tiges désignées sont à haute qualité commerciale avec besoin d'éhoupage ;
  - l'exigence est forte de recourir aux équipes locales pour faire accepter ce type de chantier aux entreprises locales.
- Il est alors impératif que les consignes spécifiques du câbliste soient données au bûcheron (angle d'abattage, coordination, délai).

En cas de volume unitaire important, les découpes possibles peuvent être marquées par nos services mais doivent être réalisées par le câbliste qui les fera ou pas sur le chantier en fonction des capacités de son matériel.

Il est nécessaire de bien évaluer tous ces aspects en amont du chantier pour faire en sorte que le travail soit le plus simple possible et obtenir une productivité optimum.

## La gestion des houppiers

Le CNPEF\* définit les prescriptions possibles pour le traitement des houppiers (article 2.3.4) :

- « Abandon des houppiers » en l'état ;
- « Réduction des houppiers » (manuelle ou mécanisée) : réduire sur place en tronçons de 2 à 3 m de long en recherchant le contact au sol ;
- « Démontage des houppiers » (manuel ou mécanisé) : démonter les houppiers sur place en tronçons de 2 m en recherchant le contact au sol, soit un travail plus soigné et fin.

Encore faut-il bien se mettre d'accord sur ce que recouvrent les termes de ces prescriptions, car les interprétations habituelles diffèrent selon les agences, or les câblistes sont amenés à couvrir de larges territoires.

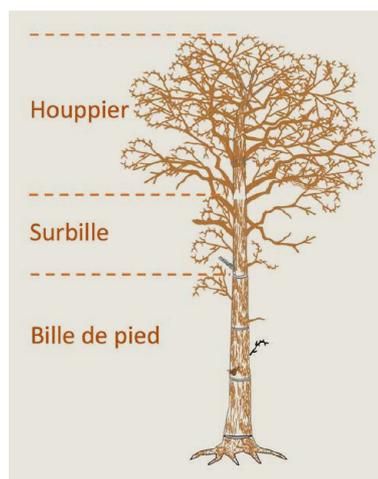
La prescription demandée doit donc être bien définie, à commencer par le compartiment concerné : le houppier seul ou avec la surbille (Fig. 1). Le cas général est d'abandonner le houppier sur le parterre de coupe et de débarquer la surbille voire les branches charpentières. Même si la

valorisation est plus faible, cela fait plus de volume sorti par ligne, ce qui permet de mieux amortir les coûts fixes supportés par le bois d'œuvre. De plus, cela permet d'éviter de devoir revenir avec un engin par temps sec pour mobiliser les bois restants et de risquer d'augmenter la surface circulée par cet engin (porteur généralement). Mais il peut y avoir des cas où des affouagistes\* se chargent des houppiers ; le câbliste ne sortira alors que le bois d'œuvre (bille de pied et surbille).

Au-delà, le choix de la prescription du CNPEF pour le traitement des houppiers reste une considération locale selon la fertilité du sol de la parcelle. La réduction ou le démontage des houppiers (rémanents) pourra être réalisé par le câbliste ou l'entreprise chargée du bûcheronnage selon les cas.

Le traitement des houppiers doit donc être défini en amont du chantier, après contact entre le câbliste et l'expert câble national ONF.

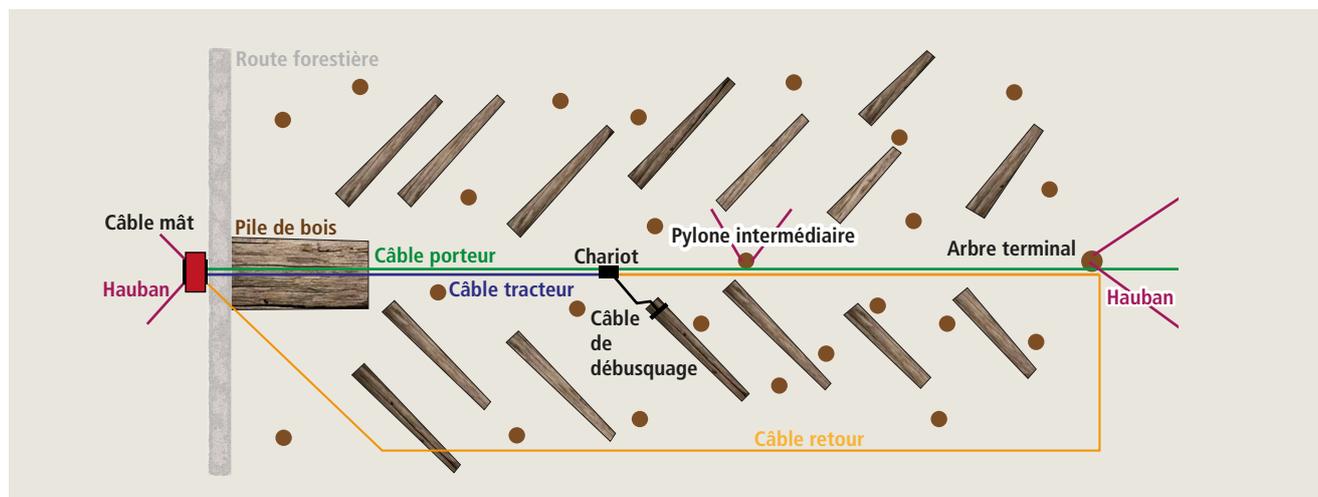
Il y a enfin le cas particulier d'une extraction complète de l'arbre. Cela n'est possible techniquement que pour les coupes de régénération. Il faut également avoir une place de travail suffisante pour permettre le stockage des houppiers avant qu'ils soient généralement repris par grappin découpeur en vue du broyage en plaquettes forestières.



← **Figure 1.** Les différents compartiments à envisager pour une commande de prestation « câble »

## La gestion du débusquage

Par la configuration de ce système d'exploitation par câble aérien (Fig. 2), le levage des bois s'effectue depuis le chariot, lui-même circulant sur le câble porteur à 10-15 m de haut selon la topographie du terrain et la hauteur des arbres du peuplement, parfois moins. En montagne, les câblistes cherchent à maximiser la flèche/déflexion du câble entre les pylônes pour optimiser la capacité de levage. En plaine, la hauteur des pylônes est le seul élément pouvant jouer mais avec une variation beaucoup plus limitée.



↑ **Figure 2.** Vue schématique d'une ligne de câble aérien (3 câbles).

Les points sont les arbres sur pied, dont certains servent de « pylône ». La « pile de bois » correspond à la zone de décrochage des grumes devant le câble-mât ; si nécessaire, les grumes peuvent être reprises par un débusqueur pour être étalées plus loin.

Selon les lois de la physique, il est plus simple de lever une charge à proximité du point de levage, que ce soit avec la grue d'un porteur ou avec le chariot d'un câble aérien (effet de bras de levier). Ainsi, les grumes les plus éloignées de la ligne sont les plus difficiles à déplacer. Cela peut devenir un problème quand les bois sont en limite de la capacité de levage du chariot, surtout s'ils n'ont pas été abattus dans la bonne direction. On retrouve aussi ces phénomènes avec les débusqueurs à câble.

Quand les bois ont un volume unitaire important ( $VUM^* \geq 5 \text{ m}^3$ ), il y a deux stratégies possibles pour éviter d'avoir à les découper :

- positionner les pylônes intermédiaires le plus haut possible mais cela va dépendre de la hauteur des arbres du peuplement à proximité de la ligne (c'est pourquoi les Allemands choisissent actuellement de systématiser en plaine l'utilisation de supports artificiels, dans la mesure où les conditions d'accès permettent de les acheminer et les installer facilement) ;
- faire marquer les découpes potentielles par le TCB\* mais laisser au câbliste le choix de les réaliser ou pas selon la capacité de son matériel ;

Si le volume prélevé par hectare est faible, il est possible de mixer les systèmes de mobilisation : débusquer avec un système terrestre (débusqueur à câble voire traction animale) jusqu'à proximité immédiate de la ligne, et débarber avec le câble aérien. Cette option est intéressante, car :

- l'impact reste très limité et juste sous la ligne de câble, même avec un débusqueur car celui-ci débusque avec son treuil sans se déplacer (les quelques déplacements se font à vide) et les lignes de câble peuvent être plus espacées (1 cloisonnement sur 4 ou 5) ;
- le coût du débusqueur ou de la traction animale est limité car les bois sont déplacés sur des distances très limitées (30 - 50m) ;

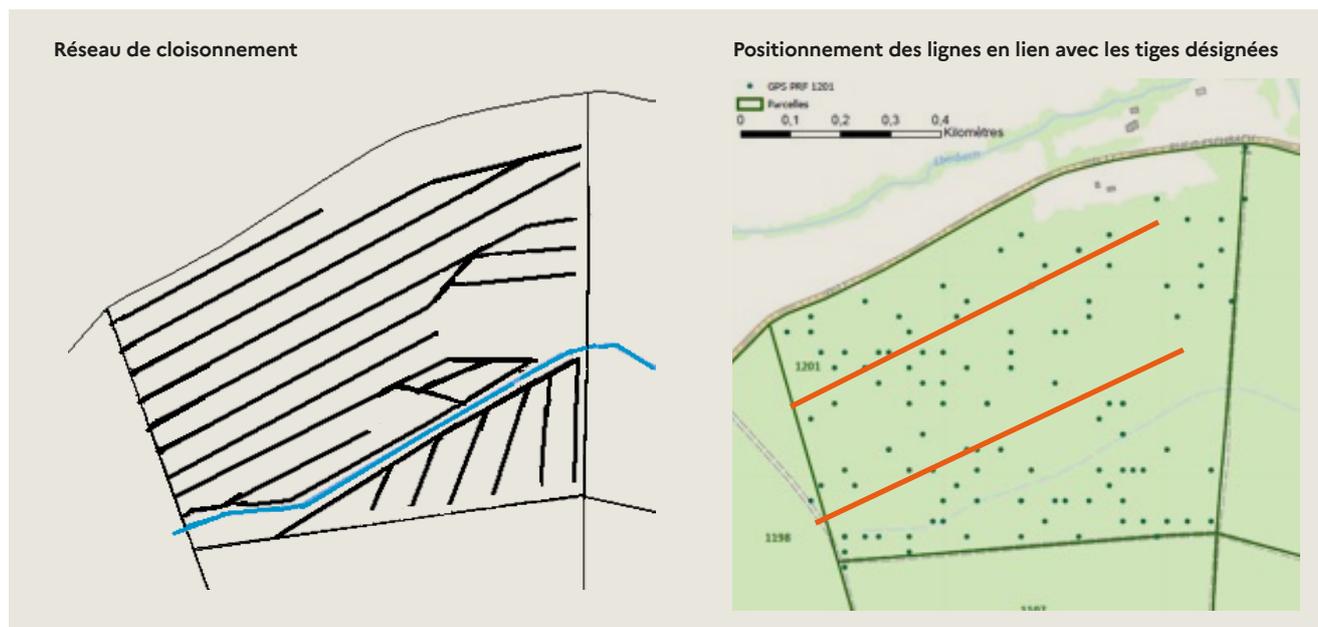
- ce coût de débusquage préalable est largement compensé par le fait que la productivité du câble aérien s'en trouve fortement augmentée (cette organisation a été utilisée en FD de Bellême avec une productivité journalière de près de  $200 \text{ m}^3$ ).

Le positionnement des lignes (Fig. 3) est donc d'une grande importance pour la bonne réalisation du chantier et une expertise initiale est indispensable pour optimiser l'organisation de ce type de chantier et la coordination entre les prestataires.

## La gestion de la communication autour de ces chantiers atypiques

À la lumière des chantiers réalisés entre 2020 et 2022, il est possible de faire quelques recommandations concernant la gestion de la communication. En effet, ce genre de chantier atypique en plaine suscite des questionnements internes comme externes auxquels il est important de répondre. Il est donc nécessaire d'associer notre service communication à ce travail, notamment pour les premiers chantiers dans un bassin donné.

**Avant le chantier**, il est nécessaire en interne de bien expliquer les raisons du choix du câble aérien (unité territoriale concernée et services de l'agence). Il peut aussi être envisagé d'informer les entreprises de travaux forestiers locales pour favoriser les échanges au sujet de l'utilisation de ce système aérien. Le seul mot d'ordre est d'anticiper cette organisation, vu le nombre potentiel de personnes concernées.



↑ **Figure 3.** Exemple de positionnement des lignes de câble dans une parcelle cloisonnée. À gauche, le réseau de cloisonnement ; à droite, localisation des tiges désignées et positionnement de deux lignes de câbles, soit une ligne de câble pour 4 cloisonnements. Les tiges près des limites de parcelles, au sud du cours d'eau ou à l'est près de la piste, seront débusquées au tracteur via les cloisonnements.

**Pendant le chantier**, la communication interne ONF doit être gérée de façon à ne pas interrompre la production du câbliste. La communication externe (presse, élus, partenaires, scieurs, ETF...) doit donc être organisée le plus tôt possible. Si des visites sur le terrain sont possibles, il faut s'assurer de les regrouper au maximum. Cependant il peut être nécessaire de trier le public : professionnels d'une part (ETF, exploitants, scieurs), élus ou associations d'autres part.

**Après le chantier**, il est souhaitable de faire un débriefing à chaud avec les équipes locales et les services engagés (forêt et bois) pour bien poser et partager les éléments du retour d'expérience quantitatif et qualitatif de la prestation avec les points d'amélioration potentiels. Ce retour d'expérience est aussi à faire remonter au chargé de mission câble national. En effet, une capitalisation globale est nécessaire pour mieux anticiper, organiser, piloter et suivre de potentiels futurs chantiers sur le même massif mais aussi ailleurs.

## Retour d'expérience technique et économique

### 2020 : premiers chantiers en urgence

Après des précipitations diluviennes fin 2019, il était question en février 2020 de quelque 10 000 m<sup>3</sup> de bois immobilisés sur coupe en région Bretagne et dans la Loire Atlantique.

L'expertise des différentes parcelles a permis d'identifier plusieurs milliers de m<sup>3</sup> potentiels pour le câble et le marché a été finalement lancé pour quelque 1 330 m<sup>3</sup> en forêts domaniales de Saint-Aubin-du-Cormier (35) et du Gâvre (44).

Les chantiers ont commencé respectivement le 15 avril et le 5 mai 2020.

- À Saint-Aubin-du-Cormier, débardage de deux parcelles en coupe d'amélioration pour un total de 750m<sup>3</sup>. Volume Unitaire Moyen : 2 m<sup>3</sup>. Ligne de 350 à 600m. Indice de Prélèvement Câble : 0,33 m<sup>3</sup>/ml
- Au Gâvre, débardage de deux parcelles, l'une en coupe définitive de régénération, l'autre en coupe d'amélioration, pour un total de 450 m<sup>3</sup>. Pour la coupe définitive : IPC = 1 m<sup>3</sup>/ml, VUM = 1,5 m<sup>3</sup> et ligne de 250m. Pour la coupe d'amélioration : IPC = 0,5 m<sup>3</sup>/ml, VUM = 1,5 m<sup>3</sup> et ligne de 450 m. Dans les deux cas, la reprise des bois au tracteur devant le câble-mât a été nécessaire pour les étaler sur la piste, tant la pile était volumineuse.
- L'équipe intervenant était composée de deux câblistes et d'un assembleur pour les aspects administratifs. Le matériel utilisé :
  - un câble-mât d'origine autrichienne (Mayr-Melnhof) d'une capacité de levage de 3 tonnes (portée max de 800 m) ;
  - un débardeur HSM à grue.

Les agents locaux ont constaté une très bonne productivité (près de 150 m<sup>3</sup> jour) avec des résultats qualitatifs excellents, particulièrement visibles sur la coupe d'amélioration avec très peu d'impacts au sol ou sur les arbres debout, alors même que le bucheronnage n'avait pas été réalisé pour le câble dans les deux cas.

Le prix de la prestation de débardage se monte à 51 €/m<sup>3</sup>, à quoi s'ajoute le transfert des machines pour 11 000 €. Ces montants peuvent paraître élevés mais sont à remettre dans un contexte technique (« sauvetage » des bois), et sanitaire (confinement) compliqué. En temps normal, le transfert aurait pu être réalisé pour environ 8 000 €. Et si le débardage au câble avait été envisagé dès le départ, le bûcheronnage aurait été fait en conséquence et aurait évité que les bois soient repris plusieurs fois pour les amener jusqu'aux cloisonnements sous la ligne de câble sans faire de dégâts ; reprise qui a entraîné un surcoût de 11 €/m<sup>3</sup>. Le surcoût total (bûcheronnage inadapté, organisation des transferts, gîtes et SAV fermés...) par rapport à une prestation normale de débardage par câble en plaine est estimé à + 19 €/m<sup>3</sup>.

Les prix de vente des bois ont subi de fortes baisses liées à la crise COVID soit -25 à -30% des estimations. Ils étaient en moyenne de 104 €/m<sup>3</sup> et 125 €/m<sup>3</sup>, respectivement, aux ventes du 5 juin et du 24 juin à Lamotte-Beuvron (41).

Malgré tout, les bois sortis ont pu être vendus sans dépréciation qualitative. De plus, la qualité de la prestation a aussi été reconnue par les techniciens forestiers locaux. Les prix de prestation ramenés à des prix de vente normaux ont permis à la DT COA de conclure positivement avec un impératif organisationnel identifié : anticiper l'organisation de ces chantiers pour sortir les bois en janvier ou février.

### 2021 : deux chantiers dûment anticipés

Suite aux bons résultats de 2020, il a été décidé de continuer ce type d'opération en DT COA. Ainsi, un marché ponctuel avec un jeune ETF câbliste ayant travaillé chez un câbliste historique alsacien a été passé pour deux chantiers :

- FD du Gâvre : une coupe d'amélioration de 850 m<sup>3</sup> avec un VUM de 2 m<sup>3</sup>. IPC = 0,5 m<sup>3</sup>/ml. Ligne de 350 à 550m.
- FD de Mervent : une coupe définitive de 509 m<sup>3</sup>. VUM 2,5 m<sup>3</sup>. IPC = 0,7 m<sup>3</sup>/ml. Ligne de 200 à 300 m.

Ici, l'ETF s'est chargé du bûcheronnage manuel et du débardage par câble.

La productivité journalière était bonne (63 m<sup>3</sup>/jour hors montage) et avec de bons résultats qualitatifs

Prix de la prestation : 36 €/m<sup>3</sup>

Prix de vente des bois : la recette totale (contrats plus vente par soumission et vente de bois de chauffage) donne une moyenne de 117 €/m<sup>3</sup> au Gâvre, et de 97 €/m<sup>3</sup> à Mervent.

## 2022 : le système s'affirme

Quatre chantiers ont été réalisés début 2022 (Tab. 1) : deux en coupes d'amélioration de chêne/hêtre, en FD de Vincence dans la Nièvre (58) et en FD de Bercé dans la Sarthe (72), et deux en coupes définitives de régénération de chêne, en FD de Bercé et en FD de Chauv dans le Jura (39). Remarque : les calculs de tarif cible ont été réalisés avant la période d'inflation.

**En FD de Vincence (parcelle 92, coupe d'amélioration)** le chantier s'est déroulé en janvier. Le bucheronnage a été réalisé par les ouvriers forestiers de l'ONF pour la quasi-totalité du volume en suivant les consignes du câbliste. Les chiffres :

- Volume unitaire : 3 m<sup>3</sup>
- 550 m<sup>3</sup> exploités en 12 jours sur 3 lignes ce qui donne une productivité effective du débardage : 46 m<sup>3</sup>/jour
- Tarif facturé pour le débardage : 37,5 €/m<sup>3</sup> (dont 4,1 €/m<sup>3</sup> de coût de transfert/déplacement)
- Prix de vente des bois (Vente en ligne le 25 février 2022 en deux lots de chêne) : 433 €/m<sup>3</sup>

Deux pistes d'amélioration principales ont été identifiées : (1) anticipation de l'abattage (2) massification de plusieurs chantiers pour augmenter le volume et diminuer les coûts de transfert des machines. En intégrant ces améliorations, il est possible de viser un tarif cible pour cette prestation de débardage par câble de 26 €/m<sup>3</sup>.

**En FD de Bercé (parcelle 100)** le chantier de la coupe d'amélioration s'est déroulé en avril en complément de celui de la parcelle 120 pour Notre Dame de Paris (voir ci-après). Le bucheronnage a été réalisé par une ETF locale. Les chiffres :

- Volume unitaire : 1,5 m<sup>3</sup>
- 170 m<sup>3</sup> exploités en 3,5 jours sur 1 ligne soit une productivité du débardage de 48 m<sup>3</sup>/jour
- Tarif facturé pour le débardage : 41,5€/m<sup>3</sup> (dont 10,6 €/m<sup>3</sup> de coût de transfert/déplacement)
- Prix de vente des bois : prix moyen de 390,2 €/m<sup>3</sup> pour les bois vendus par soumission au printemps, et de 103,3 €/m<sup>3</sup> pour les bois écoulés vers deux contrats d'approvisionnement. Lors des ventes de bois façonnés en contrat d'approvisionnement ou par soumission, les grumes de différentes UG peuvent être regroupées et ventilées par qualité, d'où cette notion de prix moyen

Les pistes d'amélioration principales du chantier : encadrement de la communication (particulièrement active dans le contexte d'une opération de prestige), d'une part, et amortissement des coûts de transfert, d'autre part. En intégrant ces améliorations, il est possible de viser un tarif cible pour cette prestation de débardage par câble de 28 €/m<sup>3</sup>.



© Eric Facon / FBF

↑ Chênes d'exception et débardage par câble aérien : une histoire à poursuivre

**En FD de Bercé aussi (parcelle 120)**, le chantier de la coupe définitive est un des chantiers retenus pour mobiliser des chênes destinés à Notre-Dame de Paris. Il a eu lieu en avril. Le bucheronnage a été réalisé par une ETF locale. Les chiffres :

- Volume unitaire : 7,5 m<sup>3</sup>
- 800 m<sup>3</sup> ont été exploités en 11 jours sur 4 lignes, soit une productivité du débardage de 73 m<sup>3</sup>/jour.
- Tarif facturé pour le débardage : 27,5€/m<sup>3</sup> (dont 5,09 €/m<sup>3</sup> de coût de transfert/déplacement)
- Prix de vente des bois : prix moyen de 740,2 €/m<sup>3</sup> pour les bois vendus par soumission au printemps (270 m<sup>3</sup>), et de 160 €/m<sup>3</sup> pour les bois écoulés en contrat d'approvisionnement (25 m<sup>3</sup>). Les grumes exceptionnelles sélectionnées pour la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris ont été vendus à l'établissement public NDP pour 951 €/m<sup>3</sup>.

Vu le volume unitaire très important, ce chantier exceptionnel était un défi technique pour le câble. Malgré cette incertitude, le débardage a été fait au câble pour garantir le délai de livraison bord de route des bois destinés à Notre Dame de Paris et une dizaine de bois seulement, trop gros et trop loin des lignes câble, ont été sortis au débusqueur par une piste à proximité.

Ici, la principale piste d'amélioration, en plus de la communication, concernait la gestion de la reprise des bois sur la zone de décrochage devant le câble mat. En effet, vu le peu de volume par ligne, les bois pouvaient être simplement laissés devant le câble-mât pour une reprise directe par le grumier. Cela aurait évité de déplacer l'engin de reprise du câbliste. Par ailleurs, un impondérable a perturbé le chantier : l'absence de carburant GNR liée à un blocage en raffinerie a provoqué pour des entreprises en déplacement un arrêt automatique d'activité (ici 1 jour soit un surcoût de 2€/m<sup>3</sup>). En intégrant ces améliorations, et dans un contexte « normal », il est possible de viser un tarif cible pour cette prestation de débardage par câble de 18 €/m<sup>3</sup>.



Delphine Schmittlin / ONF

↑ FD de Chaux, février 2022

**En FD de Chaux** (parcelles 861 et 202, coupe définitive). Le bûcheronnage a été effectué par le câbliste avant l'arrivée de son matériel. Les chiffres :

- Volume unitaire : 4 m<sup>3</sup>
- 1478 m<sup>3</sup> exploités en 40 jours sur 4 lignes soit une productivité globale de 35 m<sup>3</sup>/jour et pour le débardage de 70 m<sup>3</sup>/jour.
- Tarif facturé de débardage : 29 €/m<sup>3</sup> (dont 3 €/m<sup>3</sup> coût de transfert/déplacement)
- Prix de la vente des bois : 650,2 €/m<sup>3</sup> pour les 211 m<sup>3</sup> de bois vendus par soumission le 11 mai, 135,3 €/m<sup>3</sup> ; pour les contrats d'approvisionnement, les prix moyens sont de 135,3 €/m<sup>3</sup> et 47,5 €/Tonne sèche respectivement en bois façonnés et bois-énergie. Soit une moyenne totale de 148,8 €/m<sup>3</sup>.

La principale piste d'amélioration pour ce chantier aurait été de sous-traiter le bûcheronnage à un ETF local pour éviter l'immobilisation du matériel du câbliste car celui-ci n'a qu'une équipe de deux personnes et ne peut réaliser les deux opérations conjointement. Ainsi en intégrant cette amélioration, il est possible de viser un tarif cible pour cette prestation de débardage par câble de 24 €/m<sup>3</sup>.

## Conclusions

Sur les 3 000 m<sup>3</sup> réalisés par les deux câblistes début 2022, le coût total moyen des chantiers, qui s'est monté à 39,96 €/m<sup>3</sup> dont 4,25 €/m<sup>3</sup> de frais de transfert et de déplacement (Tab. 1), pourrait facilement passer à 32,5 €/m<sup>3</sup>. Avec les propositions d'amélioration citées dans cet article, il est possible de viser raisonnablement un tarif cible de débardage par câble à l'avenir aux alentours de 22 - 24 €/m<sup>3</sup> (rappel : ces calculs ont été réalisés avant la hausse des prix des carburants, avant la période d'inflation).

Les tarifs pratiqués par les deux entreprises câblistes pour ces marchés ponctuels sont d'ailleurs bien en dessous du tarif en montagne. En effet, ces entreprises ont intégré le fait d'une plus longue période d'activité dans l'année et aussi le fait que les volumes unitaires sont plus élevés qu'en montagne (malgré un plus faible prélèvement). De plus, les conditions de travail sur ces chantiers de plaine sont meilleures et la facilité d'accès dans les parcelles permet un gain de temps important pour le montage des lignes et le débusquage.

Finalement, les premières conclusions que nous pouvons tirer de ces chantiers sont à plusieurs niveaux, concernant les entreprises, l'organisation des chantiers et la connaissance technique.

Chantier (+ type de coupe*)	Volume	Transfert matériels (facturé)	Montage des lignes (facturé)	Abattage (coût interne ONF ou facturé par ETF ou câbliste)	Débardage câble (facturé)	Coût total chantier	Coût de revient cible** (coût complet, abattage inclus)
(A) FD Bercé 100	170 m <sup>3</sup>	1 800 €	2 600 €	10 €/m <sup>3</sup> (Câbliste)	14,5 €/m <sup>3</sup>	50,38 €/m <sup>3</sup>	38 €/m <sup>3</sup>
(A) FD Vincence	550 m <sup>3</sup>	2 250 €	4 750 €	17,6 €/m <sup>3</sup> (OF ONF) 10 €/m <sup>3</sup> (ETF)	24 €/m <sup>3</sup>	46,73 €/m <sup>3</sup>	37 €/m <sup>3</sup>
(R) FD Bercé 120	800 m <sup>3</sup>	4 200 €	8 000 €	10 €/m <sup>3</sup> (ETF)	12,5 €/m <sup>3</sup>	37,75 €/m <sup>3</sup>	28 €/m <sup>3</sup>
(R) FD Chaux 861	654 m <sup>3</sup>	2 000 €	4 000 €	10 €/m <sup>3</sup> (câbliste)	17 €/m <sup>3</sup>	36,17 €/m <sup>3</sup>	32 €/m <sup>3</sup>
(R) FD Chaux 202	824 m <sup>3</sup>	2 500 €	7 000 €	10 €/m <sup>3</sup> (Câbliste)	17 €/m <sup>3</sup>	38,53 €/m <sup>3</sup>	
<b>TOTAL</b>	3 000 m <sup>3</sup>	4,25 €/m <sup>3</sup>	8,8 €/m <sup>3</sup>	10 €/m <sup>3</sup>	17 €/m <sup>3</sup>	39,96 €/m <sup>3</sup>	32,5 €/m <sup>3</sup>

\* A = coupe d'amélioration ; R = coupe de régénération  
 \*\* Les calculs ont été faits avant la période d'inflation

↑ **Tableau 1.** Récapitulatif des prix/coûts du débardage au câble en plaine pour les chantiers de début 2022 et estimation des coûts cible

## ▲ Côté entreprise

Le prix de prestation reflète aussi le fait que l'ETF doit prendre en charge l'entièreté de la formation des équipes (aucune formation au débardage par câble n'existe à ce jour en France, contrairement à la Suisse et l'Autriche). Pendant ce temps, la productivité n'est pas optimale et cela se répercute sur le prix des prestations.

Nous avons travaillé depuis 2021 avec la FNEDT\* et OCAPAT (organisme de financement des formations dans le milieu agricole et forestier) pour identifier des pistes de financement de formations pour les opérateurs câblistes et les chefs d'équipe. À la suite de cette démarche deux centres de formation ont déclaré leur intérêt et le travail sur les modalités de formation et possibilités de financement potentiels est en cours.

## ▲ Côté organisation des chantiers

Il existe de vraies marges de manœuvre comme explicité dans le commentaire des différents chantiers :

1. Diminuer l'impact des frais de déplacement des machines via la massification des chantiers sur un secteur, et par l'amortissement des machines sur une volumétrie annuelle plus importante
  2. Ne pas immobiliser le câble-mât pour faire l'abattage, ce qui nécessite de l'anticipation
  3. Bien définir les informations ou prescriptions concernant la gestion des houppiers et la reprise des bois
  4. Améliorer la fiabilité des volumes indiqués par la Fiche de désignation\* (choix de tarif de cubage, choix de zones échantillon...) pour une offre de prix au plus près de la réalité des tiges à enlever
  5. Bien choisir le matériel (câble) et, au besoin, la machine de reprise (nécessité ou non, type) selon le type de chantier
- Cela passe par de l'organisation interne (voir plus loin).

## ▲ Côté connaissance technique

Il semble que les seuils de l'Indice de Prélèvement Câble (IPC), très utilisés par les câblistes depuis une trentaine d'années (études CTBA, AFOCEL puis FCBA) car ils reflètent bien la complexité technico économique d'un chantier de montagne pour envisager le prix de prestation, ne soient pas un indicateur aussi efficace en plaine.

Les études conduites par FCBA dans le cadre du projet multipartenaire [NEWFOR](#) (2012-2015) ont montré qu'en montagne le chariot se déplace rarement à l'optimum de sa capacité de charge. Ceci est lié aux marges de sécurité pour prendre en compte les secousses dues aux chocs et donc aux pics de tension potentiels sur les câbles. La moyenne de la charge déplacée en montagne, avec beaucoup de variabilité, se situait à 2,1 tonnes. En suivant nos chantiers de plaine, et vu la productivité constatée, il semble bien que le volume unitaire des chênes mobilisés, notamment en coupes de régénération, fasse augmenter ce taux de charge du chariot

et ce malgré un prélèvement à l'hectare plus faible. Cet effet du volume unitaire reste une interrogation à ce jour mais nous allons faire les relevés nécessaires pour mieux le documenter. Il s'agit de bien expliciter l'effet des différents facteurs sur la productivité attendue des chantiers de plaine par rapport à la montagne : le VUM\* et l'IPC\* mais aussi l'accessibilité des parcelles et la commodité de déplacement (pédestre) sur les parcelles ainsi que les possibilités organisationnelles sur place de dépôt. Cela facilitera le classement en difficulté de ce type de chantier et facilitera d'autant plus les propositions de prix des câblistes.

## Lancement d'un marché national

Suite à ces différents retours d'expérience, et compte tenu des volumes potentiels identifiés (cf. article précédent), il a été décidé de lancer un marché national pour la mobilisation par câble en plaine. L'objectif est de donner de la visibilité aux entreprises quant à la stratégie de l'ONF pour mieux utiliser les avantages de ce système. Par ailleurs, vu le peu d'entreprises présentes sur le territoire, il est nécessaire de conforter voire de sauvegarder les compétences nécessaires à la mise en œuvre du câble aérien pour permettre un développement.

Ce marché (accord-cadre avec remise en concurrence) a retenu cinq titulaires en 2022 et peut en intégrer de nouveaux en 2023. Par ailleurs, la Direction commerciale bois et services de l'ONF a créé un poste national dédié à l'expertise des chantiers-câbles envisagés par les agences et à leur suivi. En outre, [une adresse électronique](#) dédiée est désormais à la disposition des personnels ONF qui ont des chantiers potentiels à réaliser au câble aérien ou qui ont des questions sur ce système de mobilisation.

Pour les gestionnaires que nous sommes, ce système d'exploitation permettra d'approvisionner régulièrement les usines transformatrices de bois de qualité exceptionnelle, issu d'une sylviculture de long terme, tout en honorant scrupuleusement nos engagements de gestion durable : une gestion soucieuse de la protection des sols et des tiges d'avenir, pour assurer entre autres la résilience des forêts face au changement climatique.

**Didier Pischedda<sup>1</sup>, Mickael Vericel<sup>2</sup>, Aymeric Albert<sup>3</sup>**

1. ONF-DCBS, expert national exploitation forestière

2. ONF-DCBS, chargé de mission câble et veille technologique

3. ONF-DCBS, chef du département commercial bois



# Intérêt de l'exploitation par câble aérien en plaine : analyse économique à l'échelle du cycle sylvicole du chêne

**D'un point de vue économique, dans quelle mesure l'exploitation par câble aérien impacte-t-elle (ou pas) le bilan de la sylviculture par rapport au système terrestre classique ? Au-delà du bilan de chantier immédiat, l'analyse doit évidemment prendre en compte l'ensemble des coûts directs et indirects, incluant les effets de long terme. Exemple d'analyse sur la sylviculture du chêne.**

La préservation des sols est un enjeu majeur de la gestion forestière durable, et c'est d'ailleurs un des axes forts de la politique environnementale de l'ONF. Avec les effets du changement climatique, cet enjeu revêt un caractère encore plus aigu. Or malgré les efforts importants des vingt dernières années pour diminuer les impacts du système terrestre de mobilisation des bois (implantation de réseau de cloisonnements d'exploitation, définition de seuils de sensibilité, conditions de praticabilité...), certaines difficultés demeurent (ou émergent), avec des conséquences pour la vitalité des peuplements.

Des sources d'améliorations existent cependant et l'utilisation du câble aérien en plaine en fait partie. Mais il est souvent écarté pour cause de surcoût immédiat alors qu'il peut permettre de sortir des volumes de bois importants sans risquer la dégradation des cloisonnements même si le taux d'humidité du sol est élevé.

Il est donc nécessaire de faire une analyse économique de notre sylviculture, ici pour le chêne, en considérant l'ensemble des coûts y compris des coûts et pertes évités sur le long terme à l'échelle de la vie d'un peuplement.

## Problématique

La comparaison des différents systèmes d'exploitation se fait classiquement sur des éléments technico-économiques immédiats, en établissant au besoin des typologies de chantier selon les caractéristiques de peuplements (et coupes), mais sans vision de long terme. Or le tassement des sols lié au système d'exploitation terrestre a des répercussions sur la productivité des peuplements.

## ■ État des connaissances sur les effets du tassement du sol pour les peuplements

Une première méta-analyse réalisée par Ampoorter et al. (2011) a montré que les effets du tassement du sol sur la régénération forestière sont significatifs et négatifs pour les sols limoneux. Dans une méta-analyse plus large, Mariotti et al. (2020) montrent que la biomasse produite diminue de 20% pour une compaction modérée (augmentation de densité apparente de 0.2 g cm<sup>-3</sup>), et ceci est observé pour tous les types de sol.

Le chêne est l'une des essences à plus grande valeur économique en France mais cette essence est sensible aux problèmes de tassement du sol. Sur les sites de suivi à long terme des effets du tassement (Pousse et al., même numéro), les plantations de chêne sessile sur sols limoneux compactés (1 aller-retour d'un porteur de 20t en charge) connaissent un taux de mortalité au mieux équivalent à celui des témoins sur sol non perturbé (débardage par câble-mât) et qui peut aller jusqu'au double. En effet, le tassement empêche l'eau de s'infiltrer verticalement ce qui peut créer des conditions temporairement favorables ou défavorables à l'installation des jeunes plants en fonction des précipitations printanières. Cependant les plants sur sol tassé ont une croissance en hauteur moindre (- 8 à -20 %) quelles que soient les conditions climatiques initiales de croissance, et la différence se maintient à court terme (+ 11 ans après tassement), sachant qu'on n'a pas encore le recul pour la suite (Pousse et al., même numéro). Les chênes ont également une circonférence et un volume moindres sur sol tassé par rapport au témoin, de respectivement 10 à 20% et 21 à 42%.

## ▲ Système traditionnel ou aérien : besoin d'analyse économique approfondie

Au début des années 2000, en forêt domaniale de Bellême (60), il a été décidé d'exploiter au câble les coupes de régénération de la parcelle 5, une belle chênaie sur sol limoneux très sensible, pour pouvoir conduire rapidement le renouvellement sans causer de dégâts au sol ni aux semis. Le fait de pouvoir prélever plus de volume sans dégât à chaque intervention devait permettre de réduire de moitié (au moins) la durée de renouvellement de cette parcelle. Cette opération « pionnière » devait aussi documenter la comparaison technico-économique entre système d'exploitation traditionnel et câble aérien dans ce type de contexte.

Ainsi, entre 2008 et 2014, la coupe d'ensemencement et 2 coupes secondaires ont été exploitées par câble aérien, en bois façonnés (mais la définitive a dû être réalisée au tracteur, vu le peu de tiges à sortir). Les houppiers ont quant à eux été sortis au porteur en été, sur sol bien sec, pour ne pas pénaliser la productivité du câble. Le service local a été très vigilant sur cette tâche qui, si elle avait été réalisée dans de mauvaises conditions, aurait compromis tout l'intérêt du câble en matière de préservation des sols. Le tableau 1 récapitule les éléments de comparaison technique présentés à l'issue des exploitations.

D'autres chantiers ont eu lieu à la même époque et depuis dans d'autres forêts, en particulier les quatre chantiers réalisés au premier semestre 2022 (voir dans ce numéro l'article sur les retours d'expérience). Ils ont permis de confirmer et d'étoffer les données de comparaison technico-économique. Nous nous en tenons donc pour les coûts aux données récentes.

En ce qui concerne le système aérien, ce sont les prix de bûcheronnage manuel et débardage par câble constatés sur les chantiers de 2022 pour les coupes d'amélioration et

de régénération (tableau 2). Pour le système classique, les prix moyens (abattage manuel + débardage) sont à la même période de 20 à 22 €/m<sup>3</sup> en amélioration et 18 à 20 €/m<sup>3</sup> en régénération.

	Système d'exploitation "traditionnel"	Système d'exploitation
<b>Abattage / Façonnage</b>	Manuel	Manuel
<b>Engin</b>	Débusquage des grumes au tracteur forestier "classique"	Débusquage des grumes au câble-mât
<b>Réseau de cloisonnements d'exploitation</b>	Cloisonnements de 4 mètres de large, espacés tous les 20 mètres	Les lignes de câble sont placées dans les cloisonnements existants, espacées de 80 mètres, soit 1 cloisonnement sur 4.
<b>Volume prélevé par coupe</b>	Environ 100 m <sup>3</sup> /ha. Au-delà de 100 m <sup>3</sup> /ha, la sollicitation est trop forte pour le réseau de cloisonnements qui se dégrade	Environ 200 m <sup>3</sup> /ha
<b>Durée de la régénération = de la coupe d'ensemencement à la coupe définitive</b>	15 - 20 ans	6 - 8 ans

↑ **Tableau 1.** Éléments de comparaison des deux systèmes d'exploitation -traditionnel ou par câble aérien- pour les coupes de régénération chêne en FD de Bellême.

Type de coupe	Chantier	Volume m <sup>3</sup>	Prix de l'abattage €/m <sup>3</sup>	Prix de la prestation câble €/m <sup>3</sup>	Total €/m <sup>3</sup>
Amélioration	FD Bercé 100	170	10	41,5	51,5
	FD Vincence	550	10	37,5	47,5
<b>Moyenne</b>			10	39,5	<b>49,5</b>
Régénération	FD Bercé 120	800	10	27,5	37,5
	FD Chaux 861	654	10	29	39
	FD Chaux 202	824			
<b>Moyenne</b>			10	28,25	<b>38,25</b>
<b>Total</b>		<b>3 000 m<sup>3</sup></b>			

↑ **Tableau 2.** Coûts d'exploitation des chantiers de câble réalisés en 2022. Les prix recensés ici montrent une différence entre coupes d'amélioration et coupes de régénération. Ceci est dû principalement à un volume unitaire plus faible en amélioration mais aussi, dans ces deux exemples, à des volumes de chantier plus limités.

Ces données nous montrent que la mise en place d'une exploitation au câble entraîne un surcoût de l'ordre de 15 à 25 euros/m<sup>3</sup>, ce qui est loin d'être négligeable. Mais la véritable question, en termes économiques, est bien plus large : ce surcoût de l'exploitation par câble (en dépit des avantages techniques) permet-il de maintenir l'intérêt de la sylviculture du chêne sur l'ensemble du cycle de production ?

La difficulté de l'analyse économique vient ici du fait que les effets du tassement des sols sur la croissance des peuplements ne sont pas immédiats mais se manifestent sur le long terme, pour les peuplements actuels et futurs. Nous ne nous intéressons donc pas seulement à la différence de coûts d'exploitation immédiats, qui sont évidemment plus élevés pour le système par câble, mais nous avons cherché à intégrer les effets potentiels du tassement liés au système d'exploitation traditionnel : effets en termes de mortalité juvénile, de baisse de productivité (aggravée par les sécheresses plus fréquentes), et de nécessité d'une réparation des dommages causés par les tracteurs forestiers.

## Analyse économique à long terme

Une première analyse économique sur l'ensemble du cycle sylvicole a été esquissée en 2015 à la demande de l'agence d'Alençon, pour approfondir les enseignements des chantiers de Bellême. Nous avons repris et consolidé cette démarche en 2022, d'après les données disponibles dans le système d'information ONF.

### ■ Méthode d'évaluation

L'indicateur économique le plus adapté en économie forestière dans ce cas de figure est le BASI : bénéfice net actualisé en séquence infinie (formule donnée en annexe). Cet indicateur repose d'abord sur le calcul du bénéfice net actualisé sur une séquence ou sur un cycle sylvicole (BAS). C'est l'équivalent actuel (à l'âge 0 du peuplement) du profit réalisé sur les  $n$  années du cycle. Il s'agit de la différence, en valeurs actualisées, entre l'ensemble des recettes et des coûts qui interviennent sur toute la durée du cycle et qui peuvent être des flux monétaires ponctuels ou récurrents.

## Description des différents scénarios de l'analyse économique

**1. Scénarios de base :** Exploitation traditionnelle sans cloisonnement. Étant donnée l'incertitude des impacts, nous avons défini plusieurs hypothèses :

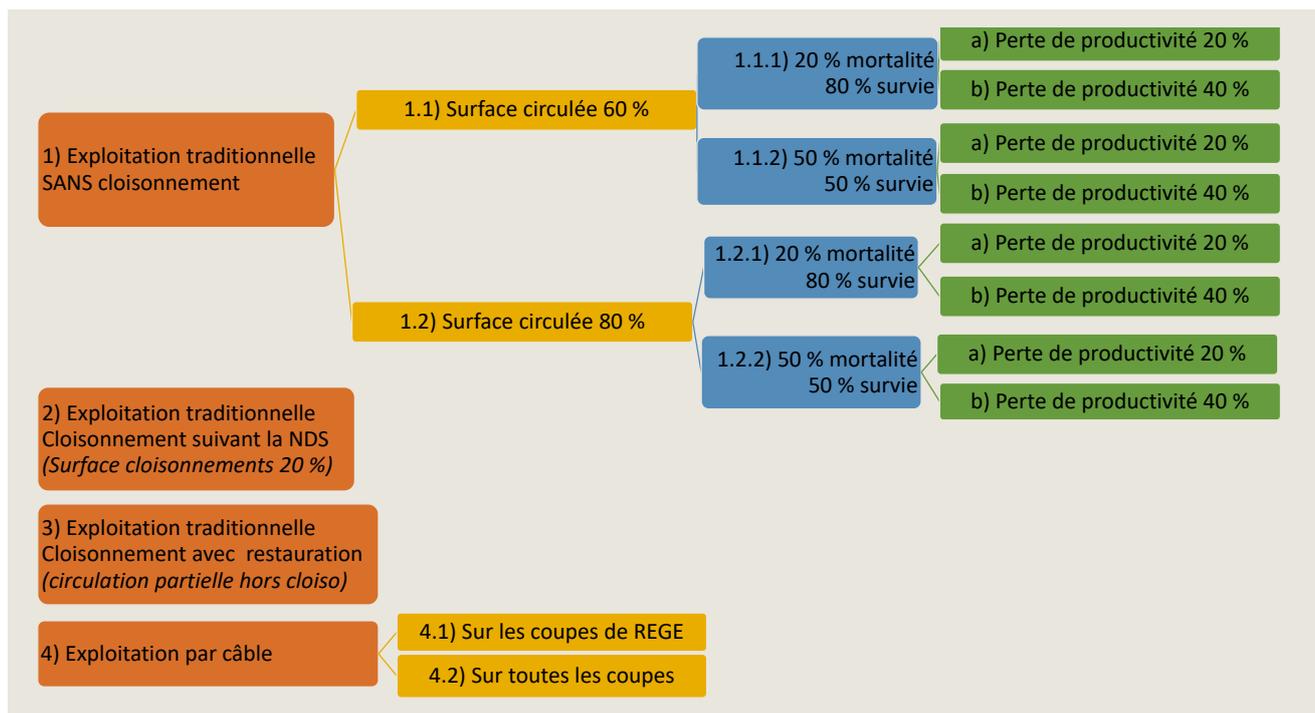
- 1.1. 60% de la surface parcellaire circulée au cours de l'ensemble du cycle.  
Une proportion de 40% a été observée pour des chantiers non cloisonnés (Cacot, 2001). On émet l'hypothèse que les 40% circulés pour chacun des chantiers successifs représentent un cumul de 60 % de la surface. Sur cette surface, on aura 20 % de mortalité pour le scénario 1.1.1 (cf. Goutal-Pousse *et al.*, 2014), et 50% pour le scénario 1.1.2 (aucun chêne sur les zones les plus circulées). Quant à la productivité des arbres survivants (peuplement restant), elle subit une baisse de 20 % (Mariotti *et al.*, 2020) ou de 40% (Pousse *et al.*, même numéro) respectivement dans les options a et b.
- 1.2. 80% de la surface circulée au cours de l'ensemble du cycle.  
Ici, on émet l'hypothèse que les 40% observés sur un chantier aboutissent, en fin de cycle, à 80% de surface circulée (observés en FD de Compiègne, Mohieddine, 2019). Sur cette surface, on aura comme précédemment 20 % (scénario 1.2.1) ou 50% de mortalité (scénario 1.2.2), et les arbres survivants peuvent présenter une perte de productivité de 20 % (option a) ou 40% (option b).

**2. Scénario NDS :** Exploitation traditionnelle avec circulation des engins seulement sur les cloisonnements et dans des conditions de cloisonnements praticables (sol sec ou gelé), selon les préconisations de la NDS-09-T-297. La mise en place du réseau de cloisonnements entraîne une perte de surface productive d'environ 20 %.

**3. Scénario NDS et réparation du sol :** Exploitation traditionnelle avec cloisonnement suivant la NDS mais des manquements aux règles de circulation en cas de fortes contraintes (sols jamais secs, risque de rupture de l'approvisionnement...) : les engins circulent alors sur cloisonnements humides, dégradent leur praticabilité et finissent par circuler à côté. D'où la nécessité d'un travail spécifique du sol (décompaction) sur l'ensemble de la parcelle au moment du renouvellement.

**4. Scénarios d'exploitation par câble :**

- 4.1. **Sur les coupes de régénération seulement :** Exploitation au câble, les lignes de câble étant installées sur des cloisonnements existants et ayant la même fonction. La perte de surface productive (cf. surface des cloisonnements) reste de 20%, la durée de régénération est raccourcie (et diminue d'autant la durée totale du cycle sylvicole) mais le coût d'exploitation est plus élevé.
- 4.2. **Sur toutes les coupes y compris les éclaircies :** Ce dernier scénario, purement théorique, permet de voir l'ampleur des écarts de résultat de ce type de calcul si on veut éviter au maximum les risques. Il entraîne seulement une perte de 3 % de surface productive sur toutes les coupes (Guide PROSOL 2009 chapitre 5 p. 79) mais un coût d'exploitation plus élevé.



↑ **Figure 1.** Scénarios selon l'intensité des effets du tassement du sol et les types d'exploitation (voir le détail en encadré).

Ensuite, le BASI correspond au calcul du BAS en répétant le même itinéraire à l'infini, en considérant que la fin d'un cycle correspond au début d'un autre. Cet indicateur est l'un des plus utilisés en économie forestière car il permet de comparer des itinéraires sylvicoles de durée différente et parce qu'il correspond à la valeur du fonds (sol nu) selon la théorie de Faustmann (Peyron et Maheut, 1999).

## Les scénarios d'exploitation retenus pour l'analyse

Le scénario de base est celui du système d'exploitation classique sans restriction de circulation des engins sur la parcelle. Faute de données précises sur les effets du tassement pour le peuplement nous avons formulé pour ce scénario différentes hypothèses de perte de productivité et de mortalité en lien avec le tassement des sols. Ce scénario de base est comparé à trois autres scénarios : celui de l'application stricte de la note de service ONF n° NDS-09-T-297 qui exige la mise en place de cloisonnements d'exploitation et interdit la circulation des engins hors de ces cloisonnements ; un scénario où les dispositions de la NDS n'ont pas pu être pleinement respectées (cloisonnements rendus impraticables) et où un travail de restauration/décompactage est nécessaire ; et enfin un scénario d'exploitation par câble. Les scénarios testés sont synthétisés dans la figure 1 et en encadré (p. 25).

## Les données utilisées pour l'analyse

L'analyse des performances économiques respectives des différents scénarios suppose de réunir ou construire les éléments permettant le calcul de tous les coûts et recettes sur l'ensemble d'un cycle sylvicole standard du chêne de qualité. Pour les recettes on a besoin d'une "fonction de prix" et d'un référentiel de prélèvement (en VUM\* et volume total) pour chaque coupe du cycle. Pour les coûts, au-delà des coûts d'exploitation déjà évoqués, on se réfère à l'itinéraire technique de travaux sylvicoles (ITTS) habituel.

## Prix du bois

Afin d'estimer le prix des bois, nous utilisons les données de ventes de l'ONF disponibles dans la base de données PRODBOIS. Les données des ventes de la direction territoriale Centre-Ouest-Aquitaine (DT COA) ont été utilisées pour être en lien avec les différents chantiers réalisés par câble aérien en plaine dans cette DT ; plus particulièrement les données de vente de bois sur pied (BSP), actuellement les plus nombreuses et qui intègrent de fait le coût de l'exploitation traditionnelle (pour la simulation du scénario câble, il faut alors utiliser les surcoûts estimés).

En filtrant sur les lots BSP de chêne vendus par soumission en DT COA en 2021, nous avons constaté que les prix de vente présentent des variations importantes (Fig. 2) selon le volume unitaire moyen du lot (VUM) mais aussi selon les contraintes environnementales d'exploitation, la concurrence des enchères, le prestige de la forêt, l'homogénéité du lot, la pente...

Pour résumer ces variations, nous avons défini un modèle statistique d'évolution du prix en fonction du volume unitaire moyen du lot (VUM). Ce modèle a la forme d'une équation polynômiale du second degré, qui permet de rendre compte de ce que les prix (le nuage de points de la figure 2) n'évoluent pas globalement de façon linéaire, mais se stabilisent sur les VUM élevés :

$$PU = -11.3VUM^2 + 127.3VUM + 139.1$$

- *PU* : Prix unitaire du lot (€/m<sup>3</sup>)
- *VUM* : Volume unitaire moyen (m<sup>3</sup>)

L'objectif ici n'est pas d'avoir une fonction de prédiction parfaite des prix mais de pouvoir estimer un prix moyen en fonction du VUM produit par la sylviculture dans cette région.

## Coûts des travaux sylvicoles

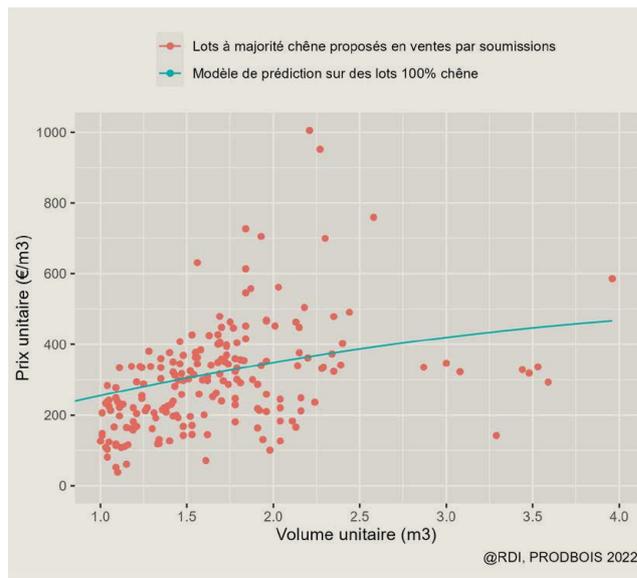
Le calendrier des travaux sylvicoles considérés correspond à l'itinéraire technique de la régénération naturelle et de l'amélioration d'une futaie de chêne préconisé dans le guide de sylviculture de la chênaie atlantique (Jarret, 2004). Les coûts ont été actualisés en 2021 grâce à la base de données TECK et correspondent aux chantiers réellement exécutés de la DT COA. Notons qu'il s'agit des travaux de base uniquement, sans prise en compte des travaux optionnels. Pour la restauration prévue par le scénario 3 (circulation hors des cloisonnements rendus impraticables), le pôle **RENFOR** a évalué (d'après Ulrich et al., 2014) un surcoût de préparation du terrain d'environ 2 000 euros/ha.

## Volumes simulés avec le modèle de croissance Fagacées

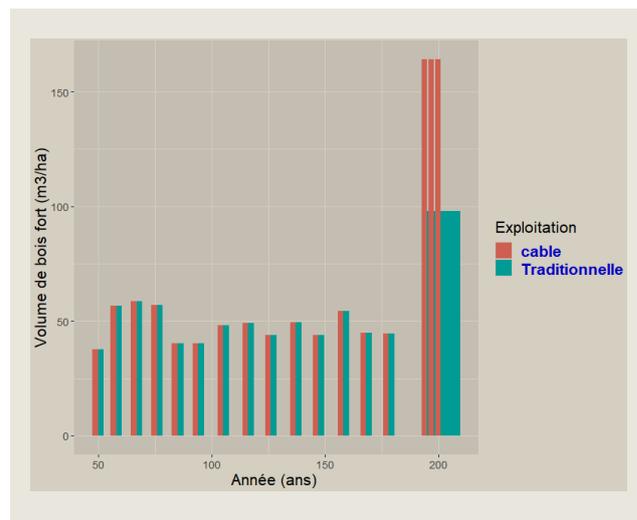
Pour calculer les volumes de bois prélevés à chaque coupe au cours du cycle (et de là les recettes et dépenses correspondantes), la méthode se base sur la simulation de la croissance du chêne en **fertilité 2** (fertilité moyenne) avec le modèle Fagacées (Le Moguédec & Dhôte, 2011).

Ce modèle permet de reconstituer la production d'un peuplement qui serait géré suivant les recommandations du guide de sylviculture de la chênaie atlantique de Jarret (2004).

Pour notre analyse, il est supposé que le volume du peuplement final est enlevé en 3 coupes de régénération seulement avec le câble, contre 5 coupes avec le système traditionnel (Fig. 3).



↑ Figure 2. Évolution du prix du chêne bois sur pied (DT COA - 2021) en fonction du volume unitaire.



↑ Figure 3. Volume de bois selon le type d'exploitation simulé avec le modèle Fagacées (Chênaie atlantique fertilité 2).

Type de travaux sylvicoles	Unité	Coût unitaire (euros/ha)
Travail/préparation de la végétation	HA	854
Création et entretien de cloisonnements	KM	120
Dégagement de régénération Naturelle	HA	742
Nettoisement - Dépressage	HA	1 154

↑ Tableau 3. Coûts moyens par type de travaux sylvicoles (en DT COA).

## Résultats

### ■ Analyse sans prise en compte des risques globaux à long terme

Dans un premier temps, nous faisons l'analyse sans tenir compte des aléas susceptibles d'intervenir au cours d'un cycle sylvicole et au-delà.

Les bénéfices à long terme (BASI) des différents scénarios étudiés (cf. fig. 1 et encadré) sont présentés dans le tableau 4. Les valeurs en elles-mêmes n'ont pas grand intérêt, ce sont surtout les écarts en pourcentage par rapport au scénario par câble (coupes de régénération) qui importent.

Selon ces résultats, l'absence de cloisonnement conduit à des pertes économiques importantes variant entre -3 % et -45 % par rapport au scénario d'exploitation par câble pour les coupes de régénération.

Les pertes les plus sévères correspondent au scénario 1.2.2.b où 80 % de la surface est circulée, avec une mortalité de 50 % du peuplement et perte de productivité de 40 %.

L'exploitation traditionnelle avec cloisonnements strictement respectés (NDS-09-T-297) et l'exploitation par câble pour les coupes de régénération présentent finalement une rentabilité économique assez proche. Mais si les conditions de circulation sur les cloisonnements ne sont pas respectées et imposent des coûts de décompaction du sol impacté, la perte par rapport au câble est de 8 %.

Contre toute attente, c'est l'exploitation par câble de toutes les coupes, avec une faible emprise au sol des lignes de câble (3 % de surface impactée), qui semble être l'option la plus intéressante économiquement sachant que pour l'instant nous n'avons de références que pour des peuplements matures.

**Dans tous les scénarios, les bénéfices de la sylviculture du chêne (en chênaie atlantique) restent toujours positifs et élevés (montants du BASI).** Ceci vient de ce que la fonction de prix de nos calculs est construite sur les données actuelles, qui bénéficient d'un contexte actuel très favorable aussi bien pour le merrain, le sciage que pour le bois d'industrie ou énergie. Par exemple, le prix du chêne de diamètre 50 cm et plus a triplé entre 2010 et 2022 en forêt publique.

Scénarios évalués avec un taux d'actualisation de 2 % Sans risque économique ou climatique	BASI (euros/ha)	Ecart par rapport au scénario 4.1 par câble (%)
<b>1) Exploitation traditionnelle SANS cloisonnement</b>		
<b>1.1) Surface circulée 60 %</b>		
<b>1.1.1) 20 % mortalité – 80 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	16 384	- 3 %
b) Perte de productivité 40 %	13 438	- 21 %
<b>1.1.2) 50 % mortalité - 50 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	13 542	-20%
b) Perte de productivité 40 %	11 701	-31%
<b>1.2) Surface circulée 80 %</b>		
<b>1.2.1) 20 % mortalité – 80 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	14 508	-14%
b) Perte de productivité 40 %	10 579	-38%
<b>1.2.2) 50 % mortalité - 50 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	12 487	-26%
b) Perte de productivité 40 %	9 344	-45%
<b>2) Exploitation traditionnelle cloisonnement suivant la NDS</b>	17 610	4%
<b>3) Exploitation traditionnelle cloisonnement avec restauration</b>	15 610	-8%
<b>4) Exploitation par câble</b>		
<b>4.1) Sur les coupes de REGE</b>	16 967	0%
<b>4.2) Sur toutes les coupes</b>	18 084	7%

↑ **Tableau 4.** Comparaison des BASI (euros/ha) selon les scénarios évalués sans prise en compte des risques. Voir la description détaillée des scénarios en encadré et Fig. 1 p. 25-26

## ■ Analyse avec prise en compte des risques globaux à long terme

Dans un second temps, nous faisons une analyse qui prend en compte des risques multiples. En effet, la stabilité de tous les paramètres intégrés dans l'analyse économique au cours du cycle de production du chêne, soit environ 200 ans, est une hypothèse forte et sans doute illusoire.

De nombreuses recherches en économie forestière sont en cours sur ce sujet complexe mais nous choisissons l'approche proposée par Reed (1984), la plus facile à mettre en place, qui consiste à augmenter la valeur du taux d'actualisation (cf. annexe) par un taux de risque. Le taux testé est ainsi de 4 %, ce qui correspond au taux d'actualisation initial de 2 % auquel on ajoute 1 % pour chacune des deux grandes catégories de risques.

La première catégorie est celle des risques relatifs aux événements macroéconomiques liés aux investissements publics : crises économiques, guerre, hausse des prix de l'énergie (Quinet, 2013).

La deuxième est celle des événements destructifs sur les forêts : tempête, sécheresse, incendie... (Rakotoarison et Loisel, 2017 ; Loisel, 2020).

Les résultats sont donnés dans le tableau 5. Ils montrent une grande sensibilité de la rentabilité économique vis-à-vis des risques multiples qui vont s'accroître dans les prochaines décennies.

Cumulés à ces risques de grande envergure (instabilité socio-économique, changement climatique...), les dégâts sur le sol en l'absence de cloisonnement peuvent diminuer la rentabilité de 16 % à 122 % par rapport au scénario d'exploitation par câble pour les coupes de régénération (4.1). La situation où 80 % de la surface est circulée avec une forte mortalité et des pertes de productivité de 40 % aboutit à des bénéfices négatifs : dans ces conditions la sylviculture de chêne n'a aucun intérêt économique.

Là aussi, le scénario exploitation traditionnelle avec cloisonnements strictement respectés (n° 2) et l'exploitation par câble pour les coupes de régénération (n° 4.1) présentent une rentabilité économique assez proche (moins de 1% d'écart).

Le pire scénario, avec un bilan très négatif, est celui où le cloisonnement existant n'a pas pu être respecté (n° 3) et oblige, au moment du renouvellement, à un travail de remise en état du sol des cloisonnements et de décompactation du sol tassé de l'interbande (écart de -245 % !).

Scénarios évalués avec un taux d'actualisation de 4 % Avec risque économique et/ou climatique	BASI (euros/ha)	Ecart par rapport au scénario 4.1 par câble (%)
<b>1) Exploitation traditionnelle SANS cloisonnement</b>		
<b>1.1) Surface circulée 60 %</b>		
<b>1.1.1) 20 % mortalité – 80 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	549,57	-16%
b) Perte de productivité 40 %	111,60	-83%
<b>1.1.2) 50 % mortalité - 50 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	518,53	-21%
b) Perte de productivité 40 %	244,80	-63%
<b>1.2) Surface circulée 80 %</b>		
<b>1.2.1) 20 % mortalité – 80 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	343,76	-47%
b) Perte de productivité 40 %	-240,20	-137%
<b>1.2.2) 50 % mortalité - 50 % survie :</b>		
a) Perte de productivité 20 %	321,68	-51%
b) Perte de productivité 40 %	-145,48	-122%
<b>2) Exploitation traditionnelle cloisonnement suivant la NDS</b>	650,26	-1%
<b>3) Exploitation traditionnelle cloisonnement avec restauration</b>	-950,09	-245%
<b>4) Exploitation par câble</b>		
<b>4.1) Sur les coupes de REGE</b>	654,28	0%
<b>4.2) Sur toutes les coupes</b>	152,73	-77%

↑ **Tableau 5.** Comparaison des BASI (euros/ha) selon les scénarios évalués avec prise en compte des risques. Voir la description détaillée des scénarios en encadré et Fig. 1 p. 25-26

Enfin, le scénario par câble sur toutes les coupes (4.2) devient peu rentable en contexte de risque. Ceci vient de ce que les surcoûts d'exploitation répétés pèsent lourdement sur la rentabilité, d'autant qu'ils interviennent dès les premières éclaircies alors même que la suite du cycle est exposée à des risques climatiques ou économiques.

## Discussion et conclusion

Ces évaluations ont été faites de manière prospective pour synthétiser les connaissances scientifiques et techniques et éclairer les prises de décisions actuelles. En effet, nous ne pouvons plus réfléchir à une gestion durable de la forêt sans intégrer les risques multiples susceptibles d'intervenir au cours du cycle sylvicole, de l'installation des peuplements jusqu'à la récolte finale.

Ici, nous avons montré que les effets potentiels du tassement du sol sur le long terme aggravent les effets des aléas d'origine externe à la gestion forestière comme le changement climatique et les crises économiques. Il y a donc un effet en cascade d'impacts à considérer qui justifie du point de vue économique les précautions à prendre pour l'environnement forestier.

Dans les scénarios testés, l'exploitation des coupes de régénération au câble semble être le scénario le plus rentable, malgré un coût de réalisation plus élevé que celui du système d'exploitation traditionnel. Ceci est d'autant plus

vrai que nous n'avons pas pu prendre en compte l'effet négatif du tassement sur la profondeur d'enracinement (-30%, Mariotti et al 2020), qui va augmenter la sensibilité des peuplements aux dérèglements climatiques. Quant aux éventuels travaux de décompaction du sol, ils sont en réalité non seulement coûteux mais peu efficaces car les conditions d'application sont difficiles à contrôler. Les effets observés montrent que la structure du sol se détériore souvent après le travail (compaction et lissage) et elle n'est améliorée que dans un nombre limité de cas. (Vast et al., 2020).

Nos évaluations ont été appliquées au cas de la chênaie atlantique mais nos résultats amènent des conclusions extrapolables à d'autres territoires. En effet, le problème de tassement du sol est observable dans tous les sols forestiers dès que les cloisonnements ne sont pas respectés.

Par ailleurs le prix de la prestation de débardage par câble semble pouvoir diminuer par rapport aux références actuelles de montagne. En effet, les chantiers en plaine sont moins difficiles qu'en montagne et les opérations de montage et démontage des lignes (poste non productif) y sont plus rapides car les déplacements et les transferts d'accessoires y sont plus simples (voir l'article sur les retours d'expérience). De plus, si nous fournissons des chantiers aux entreprises câblistes tout au long de l'année (plaine en hiver, montagne en été), les amortissements seront calculés sur 12 mois et non 6 ou 8, ce qui a un effet direct sur leur coût de revient.



© Nathalie Petrel / ONF

↑ Exploitation au câble en 2010 en FD de Bellême

Concernant les recettes, il y a évidemment des incertitudes sur le marché du chêne à long terme. Si le prix du bois de chêne et la demande augmentent ou diminuent, la rentabilité sera fortement affectée mais cela ne devrait pas modifier le classement des scénarios tel qu'il résulte de nos analyses.

Enfin, tous les effets cumulés des tassements successifs sur le long terme n'ont pas pu être évoqués dans cet article. La qualité du bois, par exemple, est difficile à quantifier. Il n'existe pas de version de modèle de croissance comme *Fagacées*, avec distribution des volumes par qualités, pour des sols endommagés. En l'absence de références bibliographiques sur l'impact du système d'exploitation sur la qualité des bois, nous avons donc considéré que la proportion de chaque catégorie de qualité n'est pas modifiée par le système d'exploitation. Cependant sur le site de suivi à long terme des effets du tassement d'Azerailles, par exemple, une grande partie des plants de chêne de 12 ans sur sol tassé (avec ou sans travaux de décompaction par la suite) étaient fourchus à 1 m de hauteur à cause d'un manque de recru lié au tassement, alors que dans le témoin non perturbé les plants avaient bénéficié du gainage par le recru naturel (Pousse *et al.*, même numéro). Ces arbres fourchus pourraient être éliminés durant les éclaircies à venir, seul un suivi à long terme permettra de connaître l'effet du système d'exploitation sur la qualité des arbres.

De même, la question des ruptures d'approvisionnement des scieries n'a pas été prise en compte. Or des systèmes d'exploitation reposant uniquement sur des engins terrestres sont exposés à de longues périodes de suspension des chantiers lorsque les sols sont trop humides, et la non-disponibilité prolongée du bois peut alors contraindre certaines usines à des semaines de chômage technique par manque de stock sur leurs parcs à bois et donc à un effondrement des prix d'achat des bois.

Nous n'avons pas intégré non plus la valeur des services écosystémiques autres que la production de bois (valeur du carbone, biodiversité, qualité de l'eau...) qui diminueront à mesure que les sols forestiers seront abîmés.

En conclusion, il y a une réflexion approfondie à mener sur ces nouvelles organisations de la mobilisation du bois à faible impact sur le sol. Et le câble est indéniablement une de ces alternatives.

**Hanitra Rakotoarison<sup>1</sup>, Didier Pischedda<sup>2</sup>, Martin Delsart<sup>1</sup>,  
Noémie Pousse<sup>3</sup>, Erwin Ulrich<sup>4</sup>**  
1. ONF-DT SEINO, pôle RDI Fontainebleau  
2. ONF-DCBS, expert national exploitation forestière  
3. ONF-DT AURA, pôle RDI Chambéry  
4. ONF-DFRN, mission adaptation des forêts au changement climatique

## RÉFÉRENCES

- Ampoorter E., De Frenne P., Hermy M., Verheyen K., 2011. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, vol. 12(5), pp. 394-402
- Cacot E., 2001. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? *AFOCEL Informations-forêt*, n°4, fiche n°637, 6 p.
- ONF - FCBA, 2009. Guide pratique : Pour une exploitation forestière respectueuse du sol et de la forêt « PROSOL ». 110 p.
- Goutal-Pousse N., Ranger J., 2014. Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de leur restauration naturelle. *Rendez-vous techniques*, n° 43, pp. 33-39
- Jarret P., 2004. Chênaie atlantique. Paris: Office national des forêts, Coll. Guide des sylvicultures. 335 p.
- Le Moguédec G., Dhôte J.-F., 2011. Fagacées: a tree-centered growth and yield model for sessile oak (*Quercus petraea* L.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, vol. 69(2), pp. 257-269
- Loisel P., 2020. Under the risk of destructive event, are there differences between timber income based and carbon sequestration based silviculture?. *Forest Policy and Economics*, vol. 120, 102269.
- Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E., Feng Z., Paoletti E., Marchi E., 2020. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* vol. 462, 118004, pp 1-9
- ONF, 2009. NDS-09-T-297 - Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols. (Document interne)
- Peyron J.L., Maheut J., 1999. Les Fondements de l'économie forestière moderne : le rôle capital de Faustmann, il y a 150 ans, et celui de quelques-uns de ses précurseurs et successeurs. *Rev. For. Fr.* vol. 51(6), pp. 679-698
- Quinet E., 2013. L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Paris : Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 354 p.
- Rakotoarison H., Loisel P., 2017. The Faustmann model under storm risk and price uncertainty: A case study of European beech in Northwestern France. *Forest Policy and Economics*, vol. 81, pp. 30-37
- Reed W.J., 1884. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 11(2), pp. 180-190
- Ulrich E.; Becker C.; Franco J.P., 2014. Préparer le sol avant plantation selon la technique "3B" avec tracteur et l'outil Culti 3B® : validation sur chantiers test 2014 - *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n° 43, pp. 11 – 21.
- Vast F., Collet C., Koller R., Pousse N., Richter N., 2020. Le profil cultural, une méthode d'observation pour analyser les impacts de la préparation mécanisée sur la structure du sol. *RenDez-Vous techniques de l'ONF* n° 63-64, pp. 57-64



## ANNEXE

## Formule de calcul du BAS et du BASI

Le **BAS** est exprimé en euros/ha et se calcule par la formule suivante :

$$BAS = \sum_{t=0}^n \left[ \frac{p_{BIBE} \cdot V_{BIBE}(t) + p \cdot V(t) - c(t)}{(1+r)^t} \right] + \sum_{t=0}^n \left[ \frac{Ra - Ca}{(1+r)^t} \right]$$

où :

$t$  : âge du peuplement, variant de 0 à  $n$ .

$p_{BIBE}$  : Prix de la biomasse destinée à l'usage en bois d'industrie (BI) ou en Bois-énergie (BE) déterminé ici par une notion de diamètre<sup>1</sup> (euros/m<sup>3</sup>).

$V_{BIBE}(t)$  : Volume de BIBE enlevé à la coupe (m<sup>3</sup>/ha), ici assimilé aux volumes de bois de diamètre inférieur à 25 cm.

$p$  : fonction de prix du bois d'œuvre (BO) sur pied qui varie selon les caractéristiques dendrométrique du bois net des coûts d'exploitation (euros/m<sup>3</sup>).

$V(t)$  : volume total de bois fort mobilisé à chaque date de coupe qui dépend de l'âge  $t$  du peuplement, de la gestion sylvicole envisagée et de la croissance du peuplement (m<sup>3</sup>/ha). Ce volume est calculé par les modèles de croissance ou les tables de production disponibles.

La recette en bois est obtenue avec la somme des recettes dans la vente de houppier et de bois fort

$C(t)$  : coûts liés aux travaux sylvicoles selon l'âge  $t$  du peuplement. Il s'agit d'un coût moyen par ha qui inclut les coûts de la main d'œuvre, des machines ou des intrants, ....

$Ra$  : Recettes annuelles (non liées aux itinéraires de sylviculture) qui peuvent provenir des recettes autres que le bois : revenu de la chasse, subvention et potentiellement un paiement pour les services écosystémiques ... (euros/ha/an).

$Ca$  : Coûts annuels (hors itinéraires de sylviculture) qui sont des dépenses récurrentes comme les frais de gestion, la taxe foncière, les primes d'assurance, les frais de gardiennage.... (euros/ha/an).

$r$  : taux d'actualisation. Son utilisation est nécessaire car les différentes recettes et coûts n'interviennent pas à la même année. Ici, nous avons fixé ce taux à 2 % comme préconisé par Terreaux (1990).

Le **BASI** se base sur l'hypothèse qu'à la fin d'une rotation, il y en a une nouvelle qui redémarre et la gestion sylvicole peut continuer ainsi à l'infini.

Pour avoir le bénéfice actualisé à séquence infini (**BASI**) exprimée en euros/ha, il faut multiplier le **BAS** par le terme

$$(1+r)^n / ((1+r)^n - 1)$$

ce qui donne :

$$BASI = BAS \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

1 • L'appellation BIBE fait référence à la biomasse provenant des houppiers, des brins, perches et arbres dont le diamètre moyen utilisé ici est en dessous de 20 à 25 cm et supérieur à 7cm.

# Le débardage par câble en plaine, un renouveau

**En dépit de difficultés réelles, le débardage par câble en plaine est une alternative à développer, mais c'est aussi un vrai défi. Et c'est aux donneurs d'ordre, publics ou privés, de donner l'impulsion pour faire en sorte que cette option puisse être utilisée à bon escient dans les situations qui le justifient.**

Les effets du dérèglement climatique ne sont plus une théorie mais bien une réalité que nous pouvons constater à plusieurs échelles de la gestion forestière. Pour ne parler que de ce qui concerne la mobilisation des bois, la tendance de ces dernières années pour la période hivernale (période clé pour l'exploitation) semble être à l'augmentation des précipitations par rapport aux conditions « normales » du passé. Il est donc de notre responsabilité de gestionnaire forestier de réfléchir aux adaptations de nos modèles sylvicoles, sans oublier d'y intégrer les capacités des différents systèmes de mobilisation des bois pour limiter au maximum les impacts et favoriser ainsi la résilience de l'écosystème forestier tout en recherchant la meilleure efficacité possible d'un point de vue technique et économique.

## Protection des sols et approvisionnement

Les sols forestiers en France, souvent argilo-limoneux, sont très sensibles en conditions humides, et la circulation des engins sur les cloisonnements lorsque les précipitations deviennent abondantes dégrade leur praticabilité dans le temps. Les forestiers suspendent alors les chantiers dans l'attente du ressuyage du sol (recommandations du guide [PRATIC'SOLS](#) et du [CNPEF](#) – Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière). Des travaux sont d'ailleurs en cours avec le soutien de l'ADEME (projet VSoilForOAD) pour permettre d'indiquer le temps de ressuyage du sol des cloisonnements et d'être au plus près de la réalité quant à la durée de ces suspensions, sachant qu'un sol sec ou gelé reste praticable par les machines forestières. Un prototype de service climatique d'aide au maintien de la praticabilité à long terme des voies de circulation en forêt sera livré pour fin 2023 avec les vitesses de ressuyage des cloisonnements.

Vu les tendances climatiques qui se dessinent, les suspensions ont donc une probabilité importante d'augmenter dans les années à venir. En conséquence, l'approvisionnement en bois des transformateurs locaux peut être stoppé,

entraînant alors des tensions économiques sur la matière première ce qui nous impacte aussi en retour en tant que fournisseur de bois. Réfléchir à des systèmes alternatifs et en disposer ne veut pas dire que nous allons renoncer au système de mobilisation terrestre classique, comme certains semblent le craindre ; cela signifie qu'il faut employer le bon système, au bon endroit, quand cela est nécessaire.

## Nécessité de la réflexion sur les systèmes de mobilisation

Réfléchir à des systèmes de mobilisation alternatifs soulève souvent des objections. Le premier contre-argument est celui des surcoûts que va nécessairement entraîner une utilisation du câble aérien ou d'ailleurs de toute autre alternative. Le gestionnaire forestier se doit plus que jamais, vu l'instabilité climatique, de disposer d'un panel de systèmes de mobilisation depuis le système terrestre mixte combinant traction animale et motorisée jusqu'au système aérien en passant par le système classique au débusqueur/porteur. Mais, cela ne peut pas s'improviser au dernier moment quand le besoin se fait sentir. Il faut mettre en place toute une organisation avec les différents intervenants de la chaîne de mobilisation et c'est donc pour l'ONF un sujet de stratégie (cf. stratégie Adaptation des forêts au changement climatique).

Olivier Rousset, alors directeur général de l'ONF par intérim, l'a exprimé très directement dans une [interview d'avril 2022](#) : « ... il est essentiel d'intensifier nos efforts, notamment pour mieux maîtriser les impacts des travaux forestiers sur les paysages et sur les sols qui constituent d'immenses réservoirs de carbone. Cela passe par le maintien systématique, quel que soit le mode de sylviculture adopté, d'un couvert de végétation au sol, par la recherche de solutions adaptées aux spécificités locales en matière de récolte de bois, et par un partenariat accru avec les entreprises de travaux forestiers et les constructeurs d'engins pour éviter toute problématique de tassement ou de dégradation des écosystèmes. »



© Didier Pischedda, ONF

↑ FD de Bercé, mars 2022

Comme évoqué dans les articles précédents, la notion de surcoût du câble aérien est souvent limitée à un constat ponctuel et ne tient pas compte des coûts évités (cf. Rakotoarison *et al.*, même numéro), c'est-à-dire des coûts indirects induits en système classique par :

- la dégradation du capital sol de la forêt et de sa capacité à stocker du carbone, voire la perte de fertilité et de résilience face au changement climatique ;
- l'étirement de la durée nécessaire pour installer la régénération ;
- le besoin de remise en état des cloisonnements, des fossés voire des buses, des pistes, etc.

Sans compter, à l'aval, le risque de rupture d'approvisionnement des transformateurs qui peut entraîner des ruptures d'activité (comme en 2016 où les intempéries ont mis les [scieries de chêne en difficulté](#)) et [des mesures de chômage partiel](#).

## Compétences sur le câble aérien

L'autre contre-argument souvent entendu est le fait que les entreprises qui possèdent le matériel et les compétences nécessaires pour le mettre en œuvre sont très peu nombreuses en France. Là aussi, il faut replacer les choses dans leur contexte.

Il n'y a pas en France de formation « câble » pour les opérateurs, ce qui oblige les entreprises à se charger elles-mêmes de la montée en compétence de leurs salariés. Cela entraîne inévitablement une baisse de la productivité, donc un effet de majoration du coût de revient. La différence est d'ailleurs flagrante avec d'autres pays européens, notamment l'Autriche et la Suisse. Parallèlement, dans ces pays, les services chargés d'aménager la desserte en montagne ont intégré depuis la fin de la seconde guerre mondiale les développements technologiques et notamment ceux des câbles-mâts qui ont succédé aux câbles

longs historiques. L'un des plus grands industriels de la filière bois en Autriche (Mayr-Melnhof) est d'ailleurs aussi constructeur de câble-mât (MM Forsttechnik GmbH).

Par ailleurs, comme l'offre et la demande sont toujours associées, si les forestiers ne font jamais appel à ce système de mobilisation, les entreprises ne se lancent pas ou celles qui le font doivent pratiquer des prix élevés pour couvrir l'ensemble de leurs frais.

Ainsi, il est indispensable d'intégrer aux programmes de formation des futurs techniciens et ingénieurs forestiers plus de connaissances sur les différents systèmes d'exploitation, notamment dans le contexte climatique changeant. Les interactions entre la mobilisation des bois et la sylviculture devraient être un sujet central dans nos formations comme évoqué dans notre article introductif (Pischedda, même numéro pp. 6-8).

D'ailleurs cette matière a un nom : « ingénierie forestière ». Cela ne signifie pas qu'il faille être spécialiste de la mécanique, de l'hydraulique ou de l'informatique embarquée (d'autres parcours professionnels existent pour cela). Il s'agit simplement de bien comprendre le champ des possibles de toutes ces technologies dans le contexte d'utilisation spécifique qu'est le milieu naturel forestier avec toute sa diversité et de l'intégrer à nos systèmes de gestion.

Erwin ULRICH écrivait en 2002 dans un article sur l'utilisation du câble : « *Allons du "Plus c'est gros, plus ça tire" (et fait des dégâts) au "le plus on a une bonne culture des techniques forestières et du choix des méthodes, le plus on peut débarder écologiquement" !* ». Une formulation qui fait penser aux travaux sur les interactions sylviculture - exploitation forestière de Cicéron Rotaru, Docteur ingénieur au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (aujourd'hui FCBA) dans les années 1980-90.

## Prise de conscience

C'est un vrai défi qui s'ouvre devant nous. Il nous faut mieux structurer les échanges entre les constructeurs et les distributeurs de matériels forestiers, les entreprises de travaux forestiers qui les utilisent, et les organismes de Recherche Développement Innovation, y compris en interne, dans le but de développer des systèmes de mobilisation le mieux adaptés à ce contexte changeant. Il est en effet consternant de devoir constater que les quelques semaines d'un chantier en période humide puissent remettre en cause les efforts d'une sylviculture et d'une gestion forestière de très longue haleine.

Souvent chacun se renvoie la responsabilité : machines trop lourdes, opérateur non conscient des contraintes de l'écosystème, acheteur de bois sur pied pressé de faire sortir ses bois, etc. Il faut se rappeler que les entreprises de

la mobilisation des bois sont de très petites structures (la moitié des 7 500 entreprises de travaux forestiers en France sont unipersonnelles). Ces entrepreneurs font le plus souvent leur travail en véritables passionnés de la forêt et sont soumis à d'énormes contraintes, vu que leur travail est rémunéré à la tâche mais tributaire d'aléas divers, sans parler des aspects liés à la sécurité.

Aussi, l'impulsion de recherche et d'innovation dans ce domaine doit venir des donneurs d'ordre publics ou privés. C'est à nous collectivement de promouvoir ces évolutions, notamment ce système de mobilisation par câble aérien, non pas pour le généraliser mais pour l'utiliser à bon escient. Pouvoir disposer au mieux de tout le panel de systèmes de mobilisation existant pour permettre leur utilisation au bon moment au bon endroit. Cela ne se décrète pas, cela se réfléchit via une stratégie définie et partagée.

### Système de mobilisation et climat

Alain le Berre, ancien directeur commercial bois et services à l'ONF, reprenait souvent cette phrase pour pousser ses équipes à penser innovation et hors des sentiers battus : « Prenez garde à ne pas être en avance d'une crainte ou en retard d'une bonne idée ».

Ainsi, j'irai jusqu'à dire que ce que nous devons rechercher, dans nos façons de mobiliser le produit de notre sylviculture, c'est que ces systèmes d'exploitation permettent de protéger les sols forestiers tout en consommant moins d'énergie fossile. Ou, pour employer des notions d'actualité, qu'ils soient « climato-compatibles ». Le câble aérien l'est assurément.

**Didier Pischedda**

ONF-DCBS, expert national exploitation forestière



© Didier Pischedda / ONF

↑ Exploitation en FD de Bonsecours (59) en 2013

### RÉFÉRENCES

- Ulrich E., 2002. En Autriche, un défi écologique pour la gestion durable des sols forestiers : l'exploitation par câble dans toutes les conditions topographiques. La Forêt Privée, 265, pp. 18-27



# Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés

**Le dispositif expérimental dédié à l'étude de l'effet du tassement sur les sols a près de 15 ans. L'analyse des mesures à 10 ans a donné des résultats parfois contrastés et difficiles à interpréter. Mais il en ressort surtout que, même dans ce cas de tassement modéré, les effets à moyen terme sont toujours très marqués tandis que les processus d'évolution naturelle sont plutôt discrets et les essais de remédiation « partiellement efficaces ».**

Le passage d'un engin en forêt est aujourd'hui un événement qui apparaît banal à beaucoup. Les mesures réalisées depuis 2007 sur un dispositif expérimental dédié dressent pourtant un tout autre portrait, avec en particulier des conséquences à long terme, tant sur le sol que sur les arbres.

Deux sites expérimentaux de suivi à long terme des effets du tassement, mis en place par INRAE avec le soutien de l'ONF, ont permis de mettre en évidence les processus initiaux de dégradation des sols suite à deux passages d'un porteur de 20 t en charge (Goutal Pousse *et al.*, 2014). Un suivi continu depuis la mise en place de ce dispositif permet d'actualiser les connaissances sur la dynamique d'évolution naturelle des sols et de la croissance des peuplements pendant les 10 premières années après tassement. La dégradation des sols et de leurs fonctions est très rapide, la restauration est quant à elle très lente, partielle et assez délicate à déchiffrer.

## 1 Des sites expérimentaux pour étudier l'évolution des sols et des peuplements après circulation d'un porteur

Les deux sites expérimentaux du dispositif sont situés sur des sols similaires issus d'un placage limoneux de 50 cm environ sur une argile, avec quelques traces témoignant de la présence d'une nappe perchée temporaire entre 40 et 50 cm de profondeur. Le premier site, mis en place en 2007, est situé en forêt domaniale des Hauts-Bois sur la commune d'Azerailles (54) ; il est nommé ci-après AZ. Le second, mis en place en 2008, se trouve en forêt domaniale de Grand Pays sur la commune de Clermont-en-

Argonne (55) ; il est nommé ci-après CA. Le climat général est similaire sur les deux sites, distants de 170 km, avec une température moyenne annuelle de 9 °C (AZ) et 9,5 °C (CA) et une pluviométrie moyenne de 900 mm (AZ) et 1 000 mm (CA). Le sol est moins acide à AZ qu'à CA avec, entre 0 et 10 cm de profondeur, un pH de 4.8 à AZ contre 4.4 à CA. Le sol de surface à AZ est également plus riche en éléments nutritifs qu'à CA, alors que c'est l'inverse dans les horizons argileux en profondeur en lien avec une meilleure stabilité des agrégats dans les horizons de surface à AZ (Bedel *et al.*, 2018).

Pour les deux sites, une coupe rase a été réalisée et les bois ont été débardés par câble-mât pour ne pas perturber le sol. Aucun engin n'a donc circulé sur le traitement témoin ; le traitement tassé correspond à l'unique aller-retour après débardage d'un porteur d'environ 20 t en charge, dans des conditions de sol frais à humide, occasionnant une diminution de hauteur du sol d'environ 5 cm (Goutal Pousse *et al.*, 2014).

À AZ, deux traitements de remédiation mécanique après tassement ont été testés : le semi-labour en plein au cover crop (disques de 20 cm de diamètre) et le travail localisé en potet au profit du plant (dent Becker montée sur mini-pelle). À CA, on a testé le semi-labour en plein au cover crop et un traitement 'chimique' par amendement calco-magnésien.

Enfin, les deux sites ont été plantés avec du chêne sessile à une densité de 1600 plants/ha.

Les placeaux expérimentaux mesurent 30 m x 50 m et sont répliqués trois fois afin de permettre le suivi temporel à long terme (cf. variabilité spatiale des sols, mesures destructrices) et des analyses statistiques.

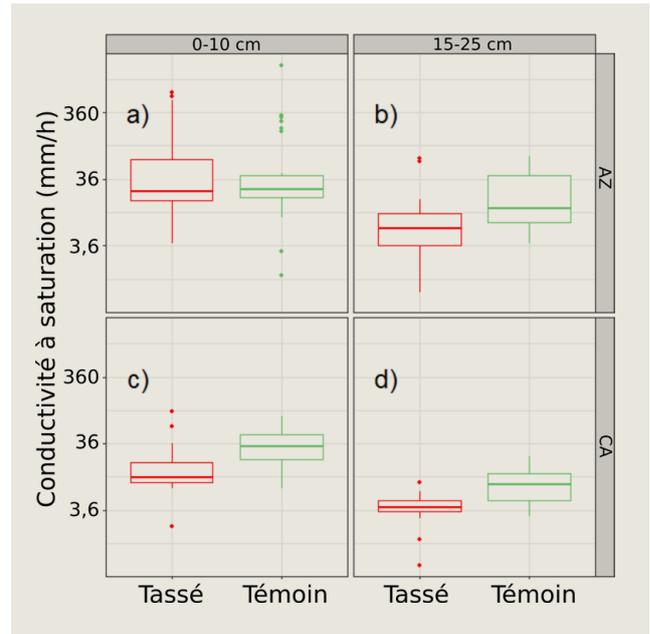
Les sites ont été lourdement instrumentés juste après la mise en place des traitements et de nombreux suivis sont réalisés depuis. Nous présentons ci-après les principaux résultats obtenus en lien avec les suivis des propriétés physiques et hydrodynamiques des sols, des nappes perchées, des solutions du sol et de la croissance des peuplements.

## 2 La dynamique de la nappe perchée temporaire est vite impactée par la circulation du porteur

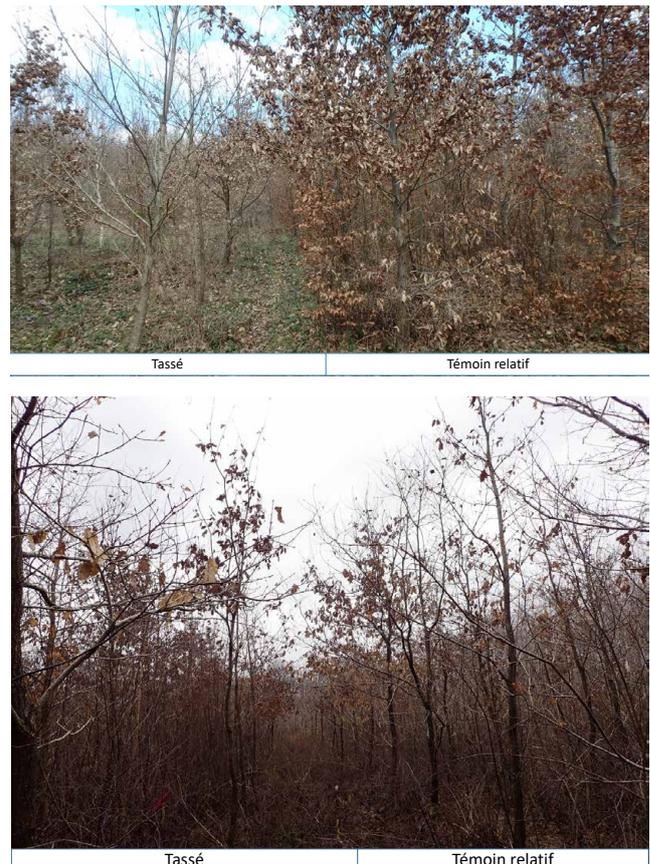
Dans les deux sites, la fréquence, la durée et le niveau d'apparition d'une nappe perchée ont augmenté très rapidement après les deux passages du porteur, par diminution de la vitesse d'infiltration verticale de l'eau dans le sol pour les deux sites. Cet engorgement de surface cause une asphyxie du sol une partie de l'année (Goutal Pousse *et al.*, 2014; Bonnaud *et al.*, 2019). L'évolution de l'intensité de l'engorgement temporaire sur les dix années suivant la circulation varie en fonction du site.

À AZ, la fréquence, la durée et le niveau d'apparition de la nappe perchée augmentent en 10 ans dans le traitement tassé alors qu'ils diminuent dans le traitement témoin, montrant une absence totale de restauration du sol tassé pour ce critère (Bonnaud *et al.*, 2019). Ces évolutions s'expliquent par l'absence d'amélioration des vitesses de transfert de l'eau dans le sol tassé (Fig. 1b) et par un développement de la strate arborée (chênes sessiles et recru ligneux) plus important dans le témoin que dans le traitement tassé pour ce site (Fig. 2).

À CA, la durée et le niveau d'apparition de la nappe augmentent dans le traitement témoin, en lien avec une augmentation de la pluviométrie hivernale (non observée à AZ), et diminuent dans le traitement tassé (Bonnaud *et al.*, 2019). Cette diminution de l'impact du tassement sur la dynamique de nappe pourrait s'expliquer par la composition du recru, dominé à CA par le bouleau qui colonise très rapidement le traitement tassé, contrairement au recru de hêtre et charme observé à AZ (Fig. 2). En effet, le bouleau tend à réduire l'intensité de l'engorgement (Czerepko *et al.*, 2018) et par ailleurs cette restauration ne vient pas d'une amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau, laquelle reste 50 % plus faible au bout de 10 ans dans le traitement tassé que dans le témoin, et ce dès la surface (Fig. 1c et 1d).



↑ **Figure 1.** Conductivité hydraulique à saturation mesurée sur les sites tassement d'AZ et CA en 2021. Plus la conductivité est élevée, plus l'eau s'infiltrerait rapidement dans le sol.



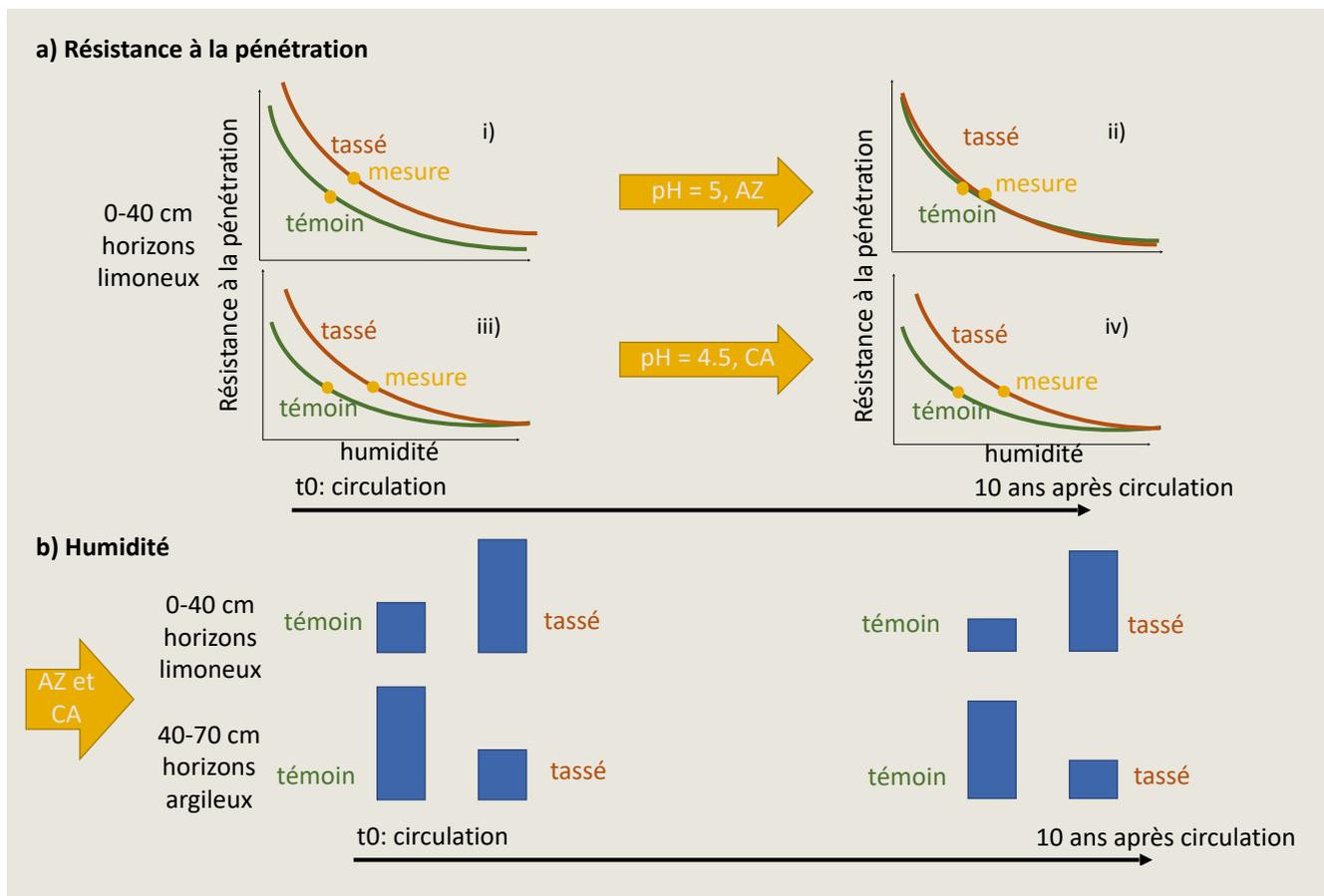
↑ **Figure 2.** Comparaison des peuplements entre le traitement tassé et la bande de témoin relatif encadrant les bandes tassées, AZ en mars 2019 en haut, CA en mars 2021 en bas.

### 3 La prospection du sol par les racines est diminuée par la circulation du porteur

À l'état sec, le tassement se traduit immédiatement par une augmentation forte de la résistance à la pénétration du sol, ce qui le rend très difficilement prospectable par les racines, tant à AZ (Fig. 3a\_i) qu'à CA (Fig. 3a\_iii). À l'état humide, l'augmentation de résistance est visible et importante à AZ (Fig. 3a\_ii), alors qu'à CA la résistance n'est plus différente entre les traitements (Pousse et al., 2022a). Cependant, le sol tassé étant asphyxié sur les deux sites (paragraphe précédent, Goutal Pousse et al., 2014; Bonnaud et al., 2019), les racines peuvent difficilement le prospector, même si la résistance à la pénétration est faible à CA.

Dix ans après tassement, à humidité équivalente, les valeurs de résistance à la pénétration du traitement tassé sont revenues au niveau de celles du témoin pour AZ (Fig. 3a\_ii). Cette évolution positive de la résistance à la pénétration doit cependant être modulée car, au cours de l'année, la dynamique de l'eau reste impactée (Fig. 3b). L'humidité de surface restant supérieure dans le tassé par rapport au témoin quasiment toute l'année, la résistance à la pénétration y est inférieure et c'est l'inverse en profondeur (Fig. 3b et 3a\_ii).

À CA, aucune évolution positive de la résistance à la pénétration n'est observée en 10 ans dans le traitement tassé (Fig. 3a\_iv).



↑ **Figure 3.** Schéma récapitulatif des effets du tassement sur l'humidité et la résistance à la pénétration des sols au cours des 10 premières années. La résistance à la pénétration du sol diminue de manière exponentielle quand l'humidité augmente. À humidité équivalente la circulation du porteur augmente la résistance à la pénétration. Dix ans après, la dynamique de l'humidité est toujours perturbée par le passage du porteur sur les deux sites. La relation entre résistance à la pénétration et humidité est proche de celle du témoin pour AZ, alors qu'à CA aucune évolution n'a été constatée.

#### 4 Le tassement modifie la composition des solutions de sols

La stabilité des agrégats est un facteur important de la rétention en éléments nutritifs (Bedel *et al.*, 2018). Aussi perturber la structure du sol par la circulation d'engins peut modifier la biogéochimie du sol et la composition des solutions de sols, c'est-à-dire de l'eau chargée d'ions qui circule dans la porosité des sols. Ces solutions sont des indicateurs pertinents du fonctionnement actuel du sol et de l'évolution de la fertilité chimique.

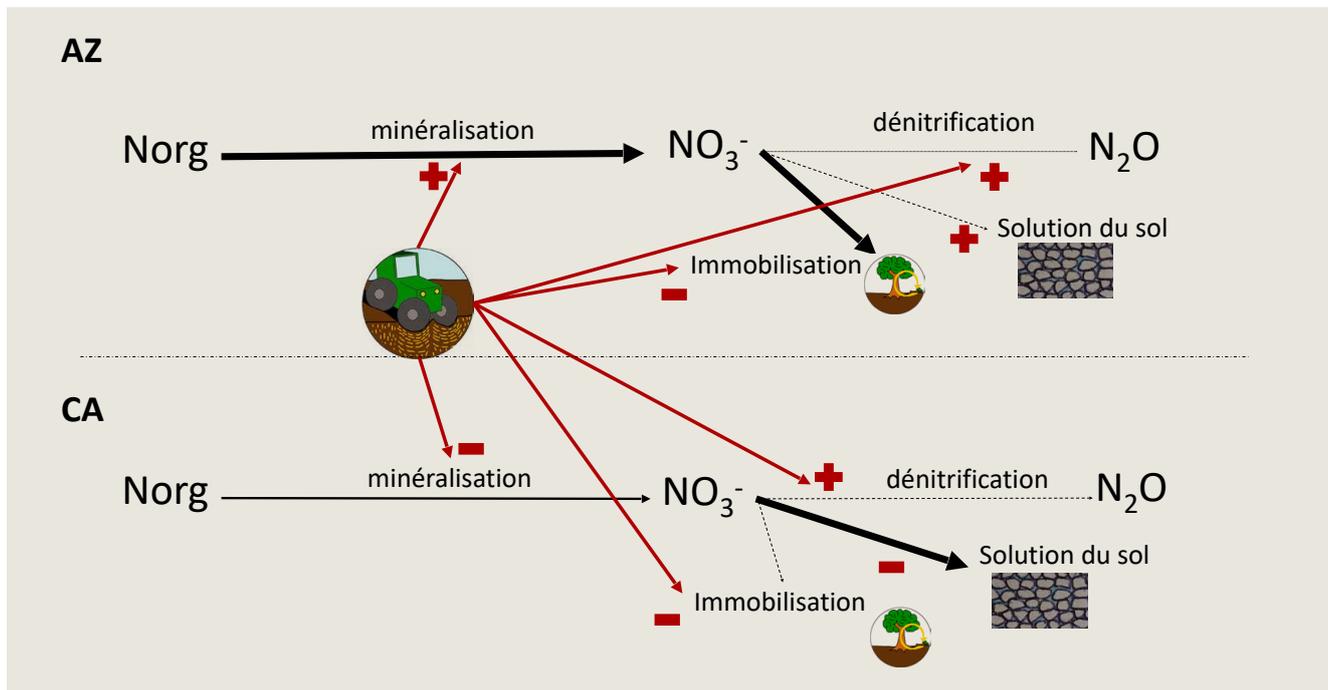
La composition des solutions du sol a été suivie pendant 10 ans et montre des impacts et des dynamiques d'évolution différents entre les deux sites (Ranger *et al.*, 2021). Dans les deux sites, la perturbation par tassement diminue l'immobilisation des nitrates, c'est-à-dire leur absorption par les arbres et l'immobilisation microbienne (Fig. 4), et elle augmente la dénitrification à cause de l'engorgement temporaire plus marqué. Toutefois, l'immobilisation des nitrates est plus forte à AZ qu'à CA en lien probable avec la richesse du sol. La perturbation diminue la production (minéralisation de l'azote organique) à CA alors qu'elle l'augmente légèrement à AZ, cette divergence n'est pas

encore élucidée. Cela conduit à un bilan opposé : alors que la concentration en nitrates est diminuée par le tassement à CA, elle est augmentée à AZ.

À son tour, cette dynamique des nitrates influence la dynamique des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  notamment) ; la solution du sol étant électriquement neutre, la production d'anions (comme le nitrate) est équilibrée par la mise en solution de cations. Le nitrate étant un anion très mobile (car très soluble dans l'eau et peu retenu sur la phase solide du sol), il peut être lixivié hors du profil de sol, induisant possible-ment une perte d'éléments nutritifs pour le sol.

Au cours du temps l'impact du tassement sur la composition des solutions du sol diminue pour les deux sites, mais plus rapidement pour CA que pour AZ (Ranger *et al.*, 2021), en lien probable avec la diminution de l'engorgement temporaire (augmentant la dénitrification) dans le traitement tassé à CA (cf. §2). Ces changements notables et durables de la chimie des eaux de sols après tassement ont pu impacter la nutrition des peuplements.

Seul un suivi à plus long terme permettra de constater si ces évolutions positives sont suffisantes pour compenser les perturbations initiales du cycle des éléments nutritifs.



↑ **Figure 4.** Schéma récapitulatif de la dynamique de l'azote sur les deux sites de suivi à long terme des effets du tassement. La minéralisation de l'azote organique (Norg) en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sur les deux sites est impactée par les deux passages du porteur (flèches et signes rouges).

## 5 Le tassement affecte durablement les peuplements et leur productivité

La perturbation par tassement a augmenté le taux de mortalité des chênes sessiles plantés à AZ (25% contre 7% dans le témoin) mais pas à CA, en lien avec la météo de la première saison de végétation : printemps humide pour AZ et normalement sec pour CA (Goutal Pousse et al., 2014). La contrainte d'engorgement temporaire en début de saison de végétation, qui est normalement plus forte dans le traitement tassé que dans le traitement témoin pour les deux sites, a été moins observée à CA qu'à AZ lors de l'installation des plants (printemps 2008 à AZ et printemps 2009 à CA). Les dispositifs ont été regarnis en plants, une fois pour CA et deux fois pour AZ. Le tassement a multiplié par deux le taux de mortalité à AZ quand on considère l'ensemble des arbres morts après les deux regarnis (60% dans le tassé contre 30% dans le témoin), alors qu'il n'y a pas eu de différence entre traitements à CA.

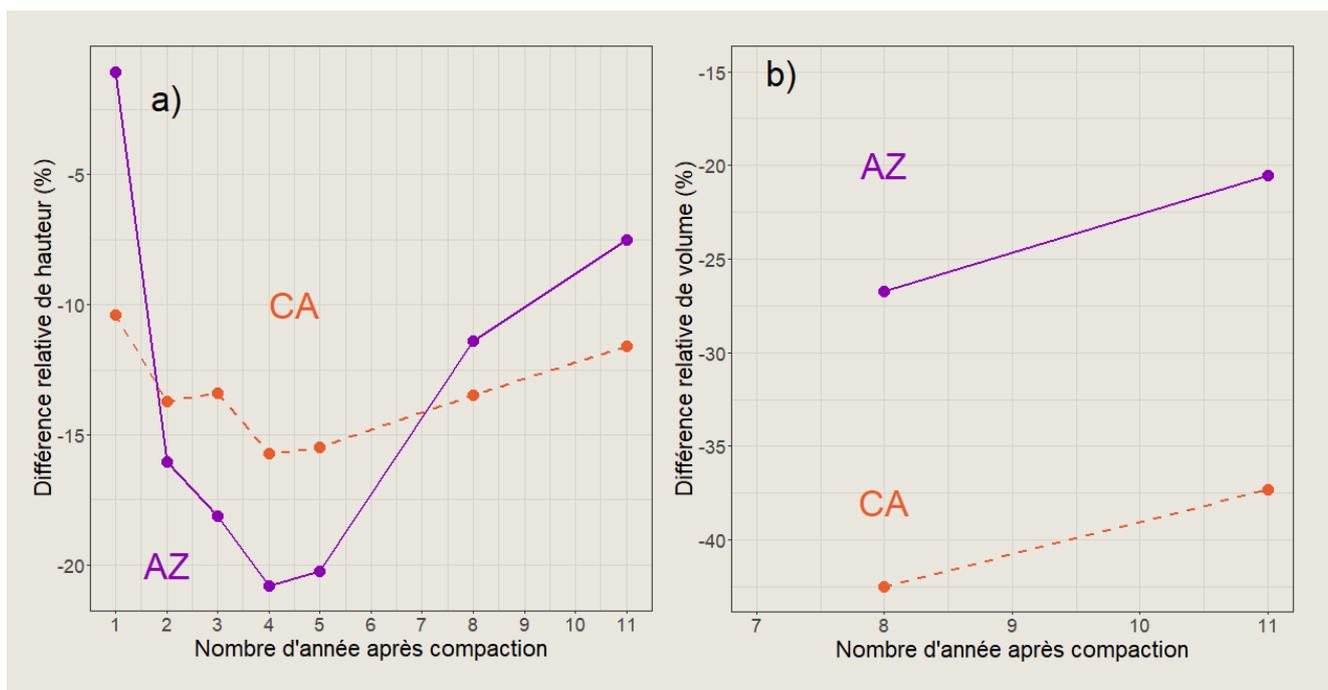
La comparaison de l'effet immédiat du tassement sur le taux de reprise de la plantation entre les deux sites montre qu'il peut être très différent selon qu'il est suivi d'un printemps sec ou humide. Le deuxième épisode de mortalité à AZ peut également s'expliquer par l'absence colonisation de la zone tassée par un recru ligneux ayant un effet sur la dynamique de la nappe perchée temporaire, notamment au printemps et en début d'été (cf. §2).

Dans tous les cas, le tassement a limité la hauteur des chênes dès les premières années (Fig. 5a). Cet effet est très variable d'une année à l'autre à AZ : proche de 0% d'écart en hauteur la première année, il atteint 20% d'écart 4 et 5

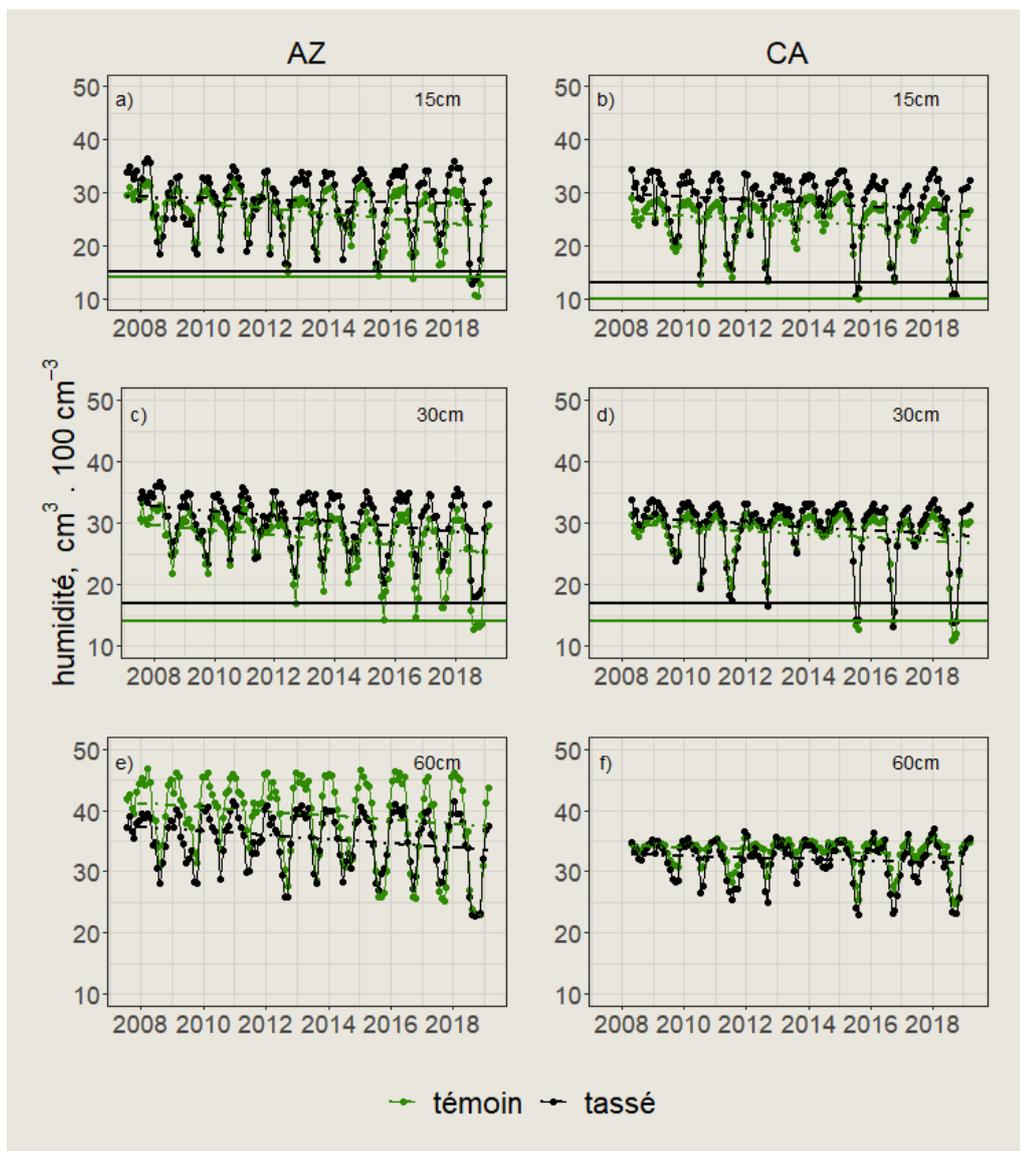
ans après tassement, pour n'être plus que de 8 % environ au bout de 11 ans. Sur CA, l'effet est plus fort dès la première année (10% d'écart) et se maintient autour de 10-15% sur les 10 années suivantes. La croissance radiale est aussi durablement affectée par le tassement sur les deux sites d'études : en effet, les circonférences mesurées 8 ans et 11 ans après tassement sont significativement plus faibles sur les traitements tassés des deux sites, avec un écart de 10 et 20% pour AZ, et d'environ 20 % pour CA.

Un calcul de volume a été réalisé 8 ans et 11 ans après tassement grâce aux tarifs de cubage issus du projet ANR Emerge (Deleuze et al., 2014). Au bout de huit ans la perte de volume dans le traitement tassé par rapport au témoin est de 27% à AZ et 42% à CA, et au bout de onze ans elle est de 21% à AZ et 37% à CA (Fig. 5b).

À AZ, l'humidité du sol dans le traitement témoin est descendue jusqu'au point de flétrissement permanent à 15 et 30 cm de profondeur lors des étés 2015, 2016 et 2018 (Fig. 6a et c). Dans le traitement tassé, ce point n'est atteint qu'à 15 cm de profondeur pour les mêmes années en lien probable avec (1) la moindre infiltration de l'eau en profondeur (Fig. 2), et (2) une productivité moindre (-20 % sur le volume) conduisant à une demande en eau plus faible des peuplements. Cet état de sécheresse des horizons limoneux plus important dans le traitement témoin pourrait en partie expliquer la diminution d'écart de hauteur entre le traitement tassé et le témoin pour les mesures 8 et 11 ans après tassement (Fig. 5a). Mais cet effet s'inversera probablement à plus long terme : étant donné que les racines et l'eau ne descendent pas en profondeur dans le traitement tassé, le réservoir en eau exploré y est donc beaucoup plus faible que dans le témoin, aggravant les effets délétères des sécheresses.



↑ **Figure 5.** Modification de la hauteur (a) et du volume (b) des peuplements de chênes sessiles dans le traitement tassé par rapport au traitement témoin en fonction du nombre d'année après tassement



← **Figure 6.** Évolution de l'humidité au cours du temps en fonction du traitement et de la profondeur. Les lignes en pointillé correspondent aux modèles d'évolution de l'humidité des sols par traitement et profondeur, les lignes horizontales en trait plein correspondent aux valeurs d'humidité au point de flétrissement permanent (en dessous de cette ligne l'eau n'est plus disponible pour la végétation).

À CA, l'humidité du sol dans le traitement tassé est descendue jusqu'au point de flétrissement permanent à 15 cm de profondeur lors des étés 2010, 2011, 2012, 2015, 2016 et 2018 (Fig. 6b) alors que, dans le traitement témoin, ça n'a été le cas que pour les étés 2015 et 2018. À 30cm de profondeur, le déficit hydrique est également plus fréquent dans le tassé que dans le témoin, en lien probable avec (1) une croissance racinaire limitée aux couches de surface (Goutal Pousse et al., 2014; Pousse et al., 2022b) et (2) un développement fort du recru de bouleau (cf. §2). Le déficit hydrique explique certainement un écart de volume entre le tassé et le témoin plus fort à CA qu'à AZ.

Quelques nids de chenilles processionnaires ont pu être observés à AZ onze ans après mise en place, mais seulement dans les traitements ayant subi un tassement (suivi ou pas de travail du sol en plein ou par potets). Dans ces traitements, la croissance des chênes avec peu de concurrence ligneuse et/ou les stress physiologiques induits par le

tassement (enracinement plus superficiel, asphyxie hivernale, résistance à la pénétration élevée en été, nutrition perturbée) les rendent peut-être plus détectables et sensibles que dans le traitement témoin.

Enfin, le recru ligneux observé à CA (bouleau en majorité) est autant présent dans le traitement tassé que dans le traitement témoin. Au contraire, à AZ, le recru (hêtre et charme en majorité) est quasiment absent du traitement tassé (Fig. 2). Les chênes du traitement tassé à AZ bénéficient donc moins de gainage et d'élagage naturel et sont ainsi plus fourchus, avec des branches basses encore bien présentes (Fig. 2). Ce qui devrait avoir des incidences sur les perspectives de commercialisation future, avec une moindre valorisation des bois du traitement tassé.

## 6 Restauration : les cycles d’humectation-dessiccation et gel-dégel ont peu d’effet

Dans les 15 premiers cm, les cycles de gel-dégel et d’humectation-dessiccation ont permis de restructurer partiellement le sol dès les premières années après tassement, créant une porosité horizontale (Goutal Pousse *et al.*, 2014; Bottinelli *et al.*, 2014b). Les températures inférieures à 0°C qui étaient observées à 10 cm en 2008 et 2009 n’ont plus été observées depuis.

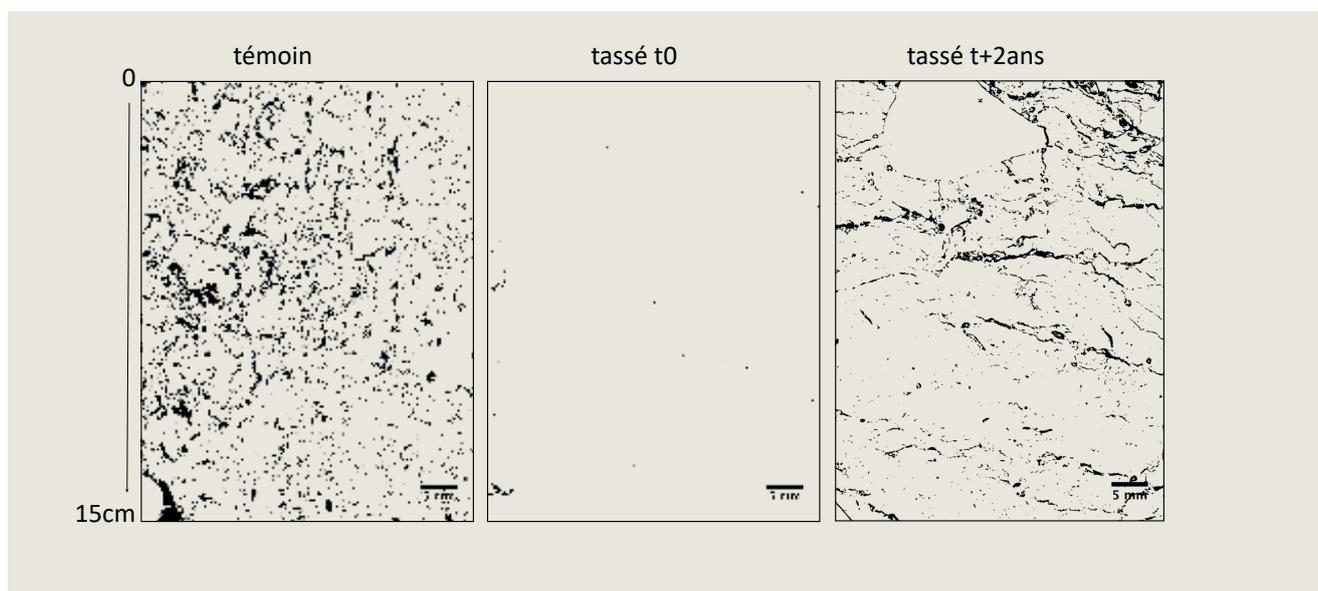
Dix ans après tassement, l’humidité mesurée dans le sol du traitement tassé, comparée à celle du témoin, reste supérieure en surface (15cm et 30cm : Figures 6a à 6d) et inférieure en profondeur (60 cm : Figures 6e et 6f). Cela témoigne d’une stagnation de l’eau en surface dans le sol tassé, eau qui n’arrive pas à percoler en profondeur. En 10 ans, l’écart d’humidité entre tassé et témoin (Figure 6, lignes pointillées) reste stable dans les deux sites aux différentes profondeurs de mesure, sauf pour la couche la plus superficielle d’AZ (-15 cm) où il augmente légèrement. La restructuration du sol par ces mécanismes naturels semble donc faible au regard de la dégradation initiale, ceux-ci n’ayant pas permis le retour à une structure favorable à l’infiltration verticale de l’eau dans le sol tassé au bout de 10 ans.

## 7 Les vers de terre, acteurs majeurs de la structuration des sols, peinent à survivre dans les traitements tassés

La circulation du porteur a eu un effet négatif rapide sur les populations de vers de terre des deux sites. Les deux sites diffèrent en termes d’acidité : pH légèrement infé-

rieur (CA) ou supérieur (AZ) à 4.5. Cette différence a une influence sur les populations de vers de terre initialement présentes : vers épigés seulement à CA; vers épigés, endogés et anéciques à AZ. Pour rappel, les vers épigés restent dans les litières, les endogés restent en profondeur dans le sol minéral et les anéciques colonisent l’ensemble du sol. Les populations de vers épigés sont revenues en quelques années dans le traitement tassé (à CA et AZ) mais à AZ les populations de vers endogés et anéciques n’ont pas recolonisé le sol tassé (Bottinelli *et al.*, 2014a). Cela a des conséquences sur les propriétés physiques des sols : les structures créées par les phénomènes physiques (i.e. gel-dégel, humectation-dessiccation) restent majoritairement orientées horizontalement, elles sont moins interconnectées que celles créées par les vers de terre anéciques (Fig. 7, Bottinelli *et al.*, 2014b), ce qui limite la circulation des gaz et de l’eau dans le sol tassé. On voit que l’évolution est engagée en surface mais le fonctionnement du sol et du peuplement est loin d’être revenu à l’état initial.

Les vers de terre anéciques comme *Lumbricus terrestris*, sont très sensibles à une augmentation de compacité du sol (Ducasse *et al.*, 2021). Quand ils sont apportés sur un cloisonnement leur participation à la restructuration du sol n’est pas observable alors qu’elle l’est dans les zones non perturbées (Ampoorter *et al.*, 2011). Dix ans après tassement, il a été testé de les faire prospérer à CA dans le traitement tassé, en les retenant dans un volume de sol emprisonné par un tube PVC pour pouvoir retrouver les survivants. Le taux de survie au bout de 6 mois est supérieur à 50%, ce qui est une bonne surprise pour un sol aussi acide. L’activité fouisseuse des vers est diminuée par le tassement mais reste cependant significative (Ducasse *et al.*, 2021). Cependant, la technique d’introduction de vers de terre anécique n’étant pas généralisable sur l’ensemble des surfaces tassées, le potentiel de régénération des sols acides et tassés par ces vers de terre semble limité.



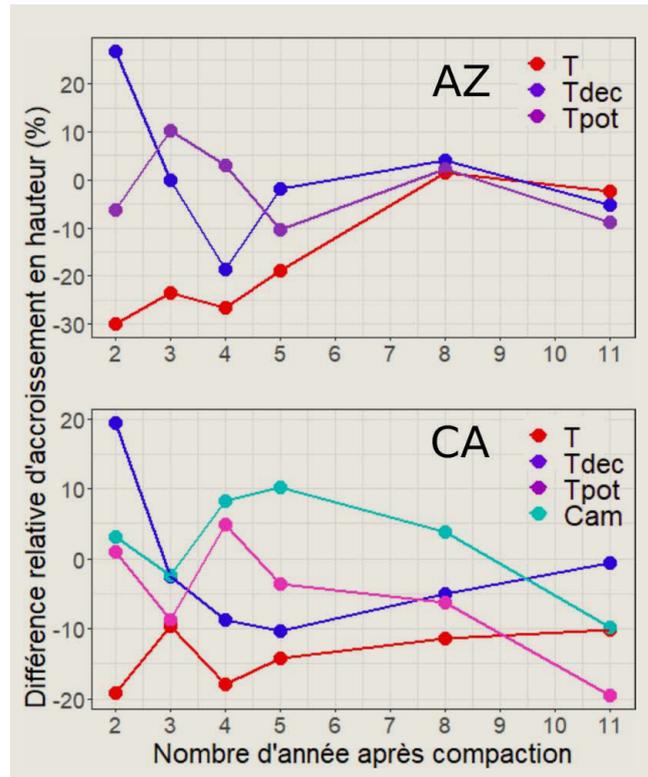
↑ Figure 7. Analyse de lames minces de sol faisant ressortir la porosité en noir et les particules solides en blanc, AZ juste après tassement (tassé t0) et 2 ans après.

## 8 Quelle technique de remédiation pour accélérer le retour à un fonctionnement non perturbé du sol ?

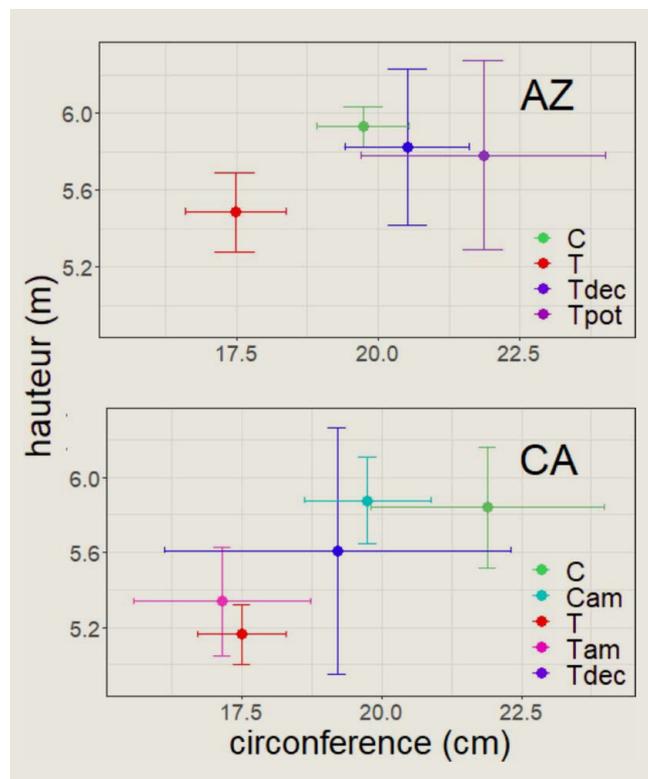
Les deux techniques de remédiation mécanique étudiées sur ces sites donnent des résultats très variables sur la vitalité des plants, en fonction de l'année et du site (Fig. 8). Les hauteurs et les circonférences au sein des traitements tassés et décompactés mécaniquement sont même plus variables entre arbres pour une même année et un même site qu'entre les traitements témoin et tassé (Fig. 9).

Le semi-labour en plein au cover crop a un effet opposé entre les deux sites sur le volume des chênes : à AZ, le volume est supérieur à celui constaté sur le témoin, de 8% et 12% au bout de huit et onze ans respectivement, tandis qu'à CA il est inférieur de 10% et 15%.

À AZ, le travail localisé en potets après tassement augmente de 29% et 23% le volume des chênes par rapport au témoin 8 et 11 ans respectivement après mise en place, surtout via l'augmentation de la circonférence (Fig. 9). L'accroissement en hauteur dans ce traitement était, dans les premières années, plus élevé que dans le témoin. Mais, après 11 ans, il est devenu moins élevé que dans le témoin et même le traitement tassé (Fig. 8), probablement parce que les racines des chênes n'arrivent pas à prospector à l'extérieur du potet ameubli. Deux ans après mise en place, le semi-labour au cover crop donnait une meilleure croissance en hauteur que le travail par potets. La tendance s'est inversée les deux années suivantes avant de revenir à un effet plus favorable du semi-labour par rapport au potet travaillé, alors que le travail du cover crop est plus superficiel que le travail par potet. Il est possible que le travail par potet rajoute une contrainte d'engorgement : l'eau qui stagne en surface à cause du tassement est drainée vers le potet et s'y infiltre facilement (car il est ameubli) sans toutefois permettre une percolation profonde de l'eau. Le potet pourrait ainsi créer un engorgement défavorable au plant (effet « baignoire »). On observe également que les deux techniques de travail du sol ne permettent pas au recru naturel de recoloniser le sol après tassement et que les chênes sur ces traitements poussent avec peu de concurrence. Cela donne un rapport hauteur sur circonférence plus faible (Fig. 9) et des chênes moins élagués (Fig. 10) que dans le témoin. Cela se ressentira probablement lors la commercialisation des bois.



↑ Figure 8. Modification de l'accroissement en hauteur par rapport au témoin pour les différents traitements testés : T = tassé, Tdec = tassé et décompacté par cover crop, Tpot = tassé et décompacté par potet au profit du plant, Tam = tassé et amendé, Cam = témoin amendé.

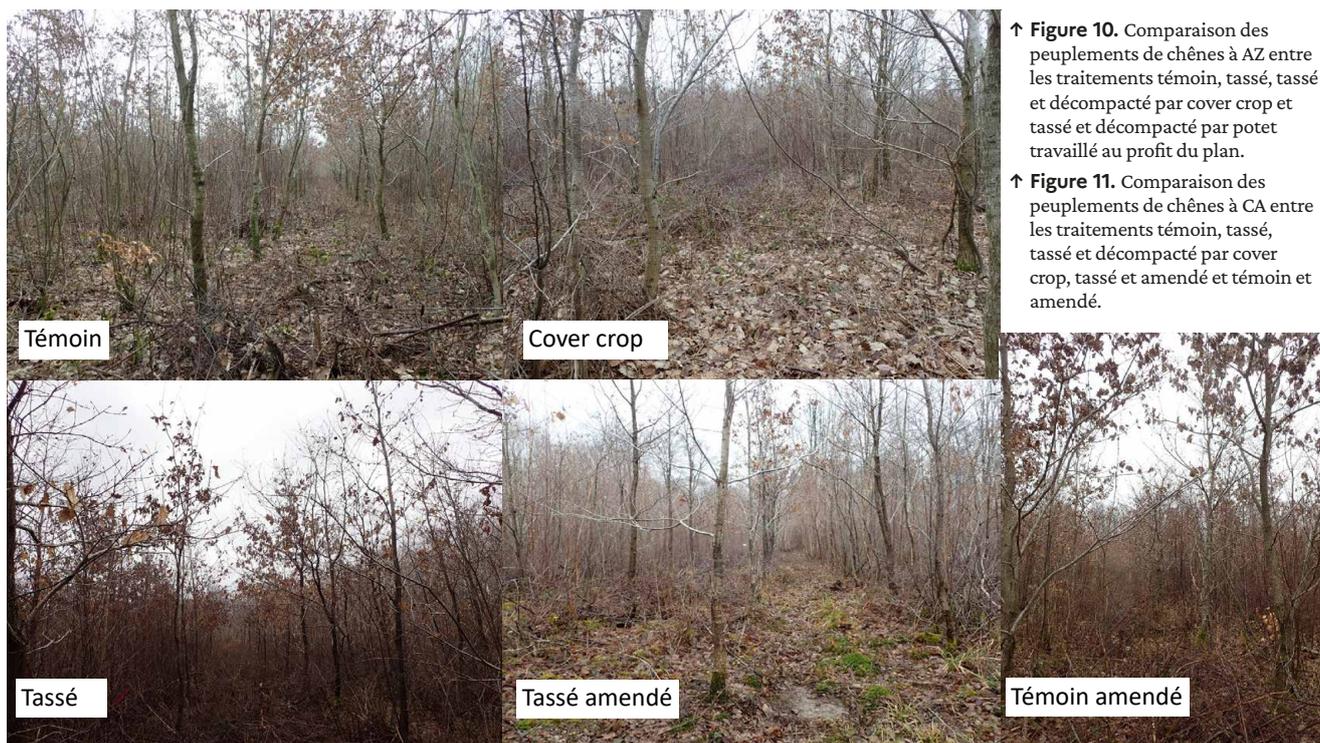


↑ Figure 9. Relation entre la hauteur et la circonférence pour les différents traitements testés 11 ans après mise en place : T = tassé, Tdec = tassé et décompacté par cover crop, Tpot = tassé et décompacté par potet au profit du plant, Tam = tassé et amendé, Cam = témoin amendé, C = témoin.



↑ **Figure 10.** Comparaison des peuplements de chênes à AZ entre les traitements témoin, tassé, tassé et décompacté par cover crop et tassé et décompacté par potet travaillé au profit du plan.

↑ **Figure 11.** Comparaison des peuplements de chênes à CA entre les traitements témoin, tassé, tassé et décompacté par cover crop, tassé et amendé et témoin et amendé.



À CA, l'amendement sur le sol non perturbé a un effet positif sur la croissance en hauteur par rapport au témoin : effet très fort les premières années (Fig. 8), mais qui devient faible (bien que toujours positif) au bout de 11 ans (Fig. 9). L'apport d'amendement après tassement a limité la perte de volume des chênes à 26% et 35% (contre 42% et 37% pour le tassement seul) par rapport au témoin au bout de 8 et 11 ans. Et l'effet sur la circonférence est nul voire légèrement négatif au bout de 11 ans par rapport au tassement seul. (Fig. 9). L'effet positif de l'amendement sur la croissance des chênes est ainsi plus faible que celui du tra-

vail par cover crop. Pourtant, l'effet de l'amendement a conduit en 10 ans à la restauration de la résistance à la pénétration du sol (Pousse et al., 2022a), probablement de manière directe grâce à l'apport d'ions flocculants et indirecte par une amélioration biologique (de la végétation aux micro-organismes). Il est probable que l'amélioration physique du sol par amendement ait conduit à une plus forte croissance du recru et des chênes (Fig. 8 et 11) conduisant à une consommation accrue d'eau et donc à une croissance plus limitée lors des dernières sécheresses.

## Conclusion

Les effets de deux passages d'un porteur de 20 t sont toujours très visibles sur les deux sites 10 ans après, même si des dynamiques d'évolution naturelle sont engagées. Bien que les deux sites soient relativement proches en termes de contextes pédologique et climatique, leurs dynamiques d'évolution sont contrastées et varient selon le critère observé, indiquant des différences de processus de régénération des sols tassés :

- À AZ le sol est un peu plus riche chimiquement. L'activité des vers de terre anéciques y est plus forte, le potentiel de restructuration du sol y est donc plus important. Au cours du temps, la résistance à la pénétration diminue et la vitesse d'infiltration de l'eau en surface augmente. Par conséquent, avec le temps, la restructuration du traitement tassé permettra peut-être d'augmenter la vitesse d'infiltration de l'eau en profondeur, diminuant ainsi la contrainte d'engorgement due à une nappe perchée temporaire et améliorant la croissance des peuplements, ce qui n'est pas encore le cas.
- À CA le sol est un peu moins riche chimiquement et il a une structure moins développée et moins stable. L'activité des vers de terre (épigés) ne se produit qu'en surface. En conséquence, la restructuration se fait principalement par gel-dégel et humectation-dessiccation, ce qui ne permet pas un retour à une structure stable et favorable à la prospection racinaire (effet toujours visible sur la résistance à la pénétration et la vitesse d'infiltration de l'eau dès la surface et jusqu'à 70 cm de profondeur). Par contre, la colonisation des sols tassés par le bouleau permet assez rapidement de diminuer l'engorgement du sol (la nappe perchée temporaire créée par tassement persiste moins longtemps). Cette dynamique végétale pourrait éventuellement contribuer à restructurer le sol (galeries de racines, exsudats racinaires...) mais plus lentement que s'il y avait une action de vers de terre anéciques.

Les techniques de remédiation testées (amendement, décompactage en plein au cover crop et décompactage par potet) sont partiellement efficaces. À court terme, le travail du sol par cover crop permet de limiter la mortalité et la perte de croissance occasionnées par le tassement, mais pas de manière systématique (un site sur les deux seulement). Le travail du sol par potet travaillé, testé seulement sur un site a également permis de limiter les effets du tassement sur les chênes. Cependant, les deux techniques de travail du sol testées ne permettent pas de corriger les effets du tassement sur la dynamique du recru naturel et donc ses effets sur la forme des chênes. L'amendement a favorisé l'installation des chênes dans le traitement tassé et a diminué l'impact du tassement sur les solutions du sol. Les effets bénéfiques du travail du sol et de l'amendement sur la croissance des chênes semblent s'atténuer au bout d'une dizaine d'années. L'amendement calco-magnésien, testé sur le site acide, permet néanmoins d'augmenter la vitesse de régénération de la structure du sol tassé.

Au final, les conséquences d'un tassement, même modéré comme dans les expériences présentées, ont un impact fort à moyen terme sur les sols et leur fonction ainsi que sur les arbres. Vu la difficulté à remédier à ces effets délétères, il est plus pertinent de limiter le tassement des sols.

Noémie Pousse<sup>1</sup>, Arnaud Legout<sup>2</sup>, Frédéric Darboux<sup>3</sup>,  
Jacques Ranger<sup>2</sup>

1. ONF, DT Auvergne-Rhône-Alpes, pôle RDI Chambéry

2. INRAE Champenoux UR 1138 Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers

3. Université de Lorraine – INRAE UMR LSE Nancy

## RÉFÉRENCES

- Ampoorter E., De Schrijver A., De Frenne P., Hermy M., Verheyen K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*, vol. 37, pp. 1734–1746
- Bedel L., Legout A., Poszwa A., van der Heijden G., Court M., Goutal-Pousse N., Montarges-Pelletier E., Ranger J., 2018. Soil aggregation may be a relevant indicator of nutrient cation availability. *Annals of Forest Science*, 75.
- Bonnaud P., Santenoise Ph., Tisserand D., Nourrisson G., Ranger J., 2019. Impact of compaction on two sensitive forest soils in Lorraine (France) assessed by the changes occurring in the perched water table. *Forest Ecology and Management*, vol. 437, pp. 380–395
- Bottinelli N., Capowiez Y., Ranger J., 2014a. 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
- Czerepko J., Boczoń A., Wróbel M., Gawryś R., Sokołowski K., 2018. Removal of birch as a means of protecting raised bog mossy vegetation *Ledo-Sphagnetum magellanici*. *Wetlands Ecology and Management*, vol. 26, pp. 689–702
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.P., Rivoire M., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Herve J.C., Vallet P., Vivien Y., 2014. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-Vous Techniques*, n° 44, pp. 22–32
- Ducasse V., Darboux F., Auclerc A., Legout A., Ranger J., Capowiez Y., 2021. Can *Lumbricus terrestris* be released in forest soils degraded by compaction? Preliminary results from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology*, vol. 168, 104131.
- 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*, 43, 33–39.
- Pousse N., Bonnaud P., Legout A., Darboux F., Ranger J., 2022a. Forest soil penetration resistance following heavy traffic: A 10-year field study. *Soil Use and Management*, vol. 38, pp. 815–835
- Pousse N., Marcet O., Blas-Larrosa J., Schneider S., 2022b. Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ? *Rendez-Vous Techniques*, n° 73, pp. 16–21
- Ranger J., Bonnaud P., Santenoise P., Zeller B., Nourrisson G., Pelletier M., Gelhaye D., Legout A., 2021. Effect of limited compaction on soil solution chemistry in two acidic forest ecosystems: Changes, recovery and impact of liming. *Forest Ecology and Management*, vol. 499, 119538.





## OURS

La revue *RenDez-Vous techniques* est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à tous les lecteurs (étudiants, établissements de recherche et autres instances forestières et environnementales, notamment). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires de la gestion (guides sylvicoles, outils de diagnostic, etc.). Son esprit est celui de la gestion durable et « multifonctionnelle » qui, face aux défis des changements globaux, doit aussi s'adapter en contexte d'incertitudes. 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 et les questionnements de la société.

### Directeur de publication

Albert Maillet

### Rédactrice en chef

Christine Micheneau

### Comité éditorial

Olivier Rousset, Albert Maillet, Xavier Bartet, Éric Dubois, Didier Pischedda, Marine Jacquet

### Conception graphique

Pollen Studio

### Réalisation

Pollen Studio

### Crédit photographique page de couverture

Mihaela TRIFA / ONF

### Périodicité

4 numéros ordinaires par an

### Accès en ligne

[www.onf.fr](http://www.onf.fr)

Accès à l'ensemble de la collection : via la notice d'un numéro quelconque (Détails/collection)

### Renseignements

ONF - documentation technique et générale, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau  
Contact :

[documentalistes@onf.fr](mailto:documentalistes@onf.fr)

### Pour soumettre un article

Contactez la rédaction : [rdvt@onf.fr](mailto:rdvt@onf.fr)

### Dépôt légal

Mars 2023

