

RenDez-Vous techniques

N° 67-68 - ÉTÉ-AUTOMNE 2020

DOSSIER

Renouvellement par trouées
en montagne : préparer le sol

ZOOM

RÉGÉNÉRER LE PIN
MARITIME EN FORÊTS
DUNAIRES D'AQUITAINE



Directeur de publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

François Bonnet, Dominique de Villebonne, Xavier Bartet,
Éric Dubois

Conception graphique

Agence LINÉAL

Crédit photographique**Page de couverture :**

couverture : Florian Rollet / ONF
(en médaillon : Jean Favennec)

Périodicité

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

Accès en ligne

<http://www.onf.fr>

Renseignements

ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : documentalistes @onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : Décembre 2020

2 ÉDITO

3 [MÉTHODES]

GESTION DURABLE DES SOLS FORESTIERS – NOUVELLES CONNAISSANCES ET BOÎTE À OUTILS

Par Noémie Pousse, Laurent Augusto, Emila Akroume, Christine Deleuze, Brigitte Pilard-Landeau, Armelle Noé, Didier Pischedda, Claudine Richter

15 DOSSIER

[DOSSIER PRATIQUES]

RENOUVELLEMENT PAR TROUÉES EN MONTAGNE : PRÉPARER LE SOL

39 [CONNAISSANCES]

ÉCHECS DE RÉGÉNÉRATION DU CHÊNE EN PRÉSENCE DE MOLINIE : AU-DELÀ D'UNE SIMPLE COMPÉTITION POUR LES RESSOURCES

Par Marine Fernandez, Philippe Malagoli, Antoine Vernay, Thierry Améglio, Philippe Balandier

46 [ZOOM]

AMÉLIORER LA RÉUSSITE DE LA RÉGÉNÉRATION NATURELLE DU PIN MARITIME DANS LES FORÊTS DUNAIRES D'AQUITAINE

Francis Maugard et Clément Magnin

52 [ZOOM]

LA RÉGÉNÉRATION DU PIN MARITIME DANS LES FORÊTS DUNAIRES D'AQUITAINE : UN PROCESSUS COMPLEXE ET MULTIFACTORIEL

Par Arthur Guignabert, Maya Gonzalez, Florian Delerue, Francis Maugard et Laurent Augusto

Vitalité des sols, réussite du renouvellement, deux piliers d'une gestion forestière durable



© Sylvain Gouraud / ONF

Albert MAILLET
Directeur Forêts
et Risques Naturels

Le sol est le socle de la gestion forestière. Sa dégradation excessive affecte tôt ou tard la vitalité des peuplements et des écosystèmes forestiers. Les travaux de recherche et développement conduits ces dernières années visent donc deux objectifs : comprendre les processus de fragilisation des sols et concevoir des outils opérationnels de diagnostic de leur sensibilité. Les travaux se poursuivent mais les outils déjà disponibles seront d'une grande utilité dans un contexte d'incertitude climatique qui renforce la nécessité de veiller au capital sols.

La réussite du renouvellement forestier est un autre pilier de la gestion durable.

L'actualité récente du « plan de relance » gouvernemental pour la reconstitution des forêts en dépérissements en est une parfaite illustration. L'ONF travaille activement à la stratégie et à la logistique de cette reconstitution.

Pour autant, la forêt n'est pas partout en crise sanitaire et le renouvellement par régénération naturelle (ou assistée) reste l'option première dans bien des situations... mais avec parfois des difficultés. Difficultés très différentes

selon les contextes géographiques, d'où la nécessité d'adopter des approches spécifiques, comme l'illustrent les trois exemples contrastés évoqués dans ce numéro : la chênaie à molinie, les forêts résineuses d'altitude et enfin les forêts dunaires d'Aquitaine.

Dans ces trois cas un contexte rude, lié au milieu lui-même, ou à la forte concurrence végétale, peut conduire à des échecs déroutants, face auxquels le gestionnaire doit se montrer agile et imaginaire ; des solutions diverses sont testées et évaluées ; les succès sont des encouragements, les échecs des sources d'enseignements.

La gestion forestière progresse ainsi, par itération successive de réussites et déconvenues, dont il convient de tirer, à chaque fois, un maximum de leçons pour le futur. Bref il s'agit d'être à la fois humble et audacieux : humble, car les changements globaux font vaciller toutes nos certitudes, mais audacieux, car l'incertitude ne doit pas devenir source de paralysie ; elle doit au contraire renforcer notre volonté d'essayer, de tenter, d'évaluer, de corriger, de nous adapter, de réagir, en un mot de continuer à apprendre.

GESTION DURABLE DES SOLS FORESTIERS – NOUVELLES CONNAISSANCES ET BOÎTE À OUTILS

Nous proposons ici un tour d'horizon des travaux récents de recherche et développement qui ont fait progresser la compréhension des impacts que l'évolution des pratiques de récolte peut avoir sur les sols forestiers.

Ces travaux débouchent sur de nouveaux outils pour le diagnostic des différents types de sensibilité des sols, de façon à mieux raisonner les méthodes de récolte.

Les pratiques de récolte en forêt évoluent sous l'effet des contraintes économiques et de changements sociétaux : besoin de maintenir une forte activité d'exploitation toute l'année pour rentabiliser les machines de plus en plus lourdes en investissement, faible attractivité des métiers de l'exploitation forestière et faibles flux financiers. Ces évolutions, qui misent sur les innovations technologiques (mécanisation pour augmenter la productivité, réduire la pénibilité du travail...) et l'optimisation des approvisionnements (flux tendus), ne sont pas sans conséquence sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Par exemple, la logique de flux tendus, en empêchant de raisonner la circulation des engins en fonction de la météo, peut dégrader les voies dédiées à la circulation et les rendre impraticables, occasionnant une augmentation de la surface consacrée à la circulation. Les impacts ne sont pas toujours visibles à court terme et sont souvent masqués par d'autres éléments perturbateurs (changements climatiques, attaques biotiques, pression du gibier...) avec lesquels ils peuvent interagir pour en aggraver les effets.

Comme les impacts de ces nouvelles pratiques ne sont pas systématiques, il est essentiel de comprendre le fonctionnement des écosystèmes ainsi que les processus et seuils qui expliquent l'apparition de dysfonctionnement après une perturbation (comme un export supplémentaire d'éléments nutritifs, ou un tassement du sol). Comprendre permet d'accepter plus facilement le besoin d'adaptation des pratiques pour préserver le bon

Noémie Pousse⁽¹⁾, Laurent Augusto⁽²⁾, Emila Akroume⁽³⁾, Christine Deleuze⁽³⁾, Brigitte Pilard-Landeau⁽⁴⁾, Armelle Noé⁽⁵⁾, Didier Pischedda⁽⁶⁾, Claudine Richter⁽⁷⁾

(1) ONF, pôle RDI d'Avignon

(2) INRAe, laboratoire Interactions Sol-Plante-Atmosphère (ISPA)

(3) ONF, pôle RDI de Dole

(4) ONF, dept. Gestion Durable et Multifonctionnelle des Forêts

(5) ONF, Agence Aube-Marne – Service Forêt

(6) ONF, dept. Commercial Bois

(7) ONF, dept Recherche, Développement & Innovation

Les auteurs remercient tous les contributeurs indirects dont les travaux font le socle de cet article :

- stagiaires ONF : Antoine Couette, Eloise Da-Silva, Samuel Durante, Julien Picard, Amandine Remy ;
- doctorants et post-doctorant INRAe : David Achat, Félix Bretoire, Manon Martin ;
- INRAe : André Chanzy, Arnaud Legout, Joseph Levillain, Jaques Ranger, Stéphane Ruy, Laurent Saint-André, Bernhard Zeller ;
- AgroParisTech : Bernard Jabiol, Christian Piedallu, Ingrid Seynave ;
- ONF : Erwin Ulrich et tous les testeurs d'outils de diagnostic ;
- GIP-ECOFOR : Guy Landmann ;
- FCBA : Philippe Ruch, Morgan Vuillermoz ;
- Informaticien indépendant : Thomas Bronner ;
- CNPF-IDF : Julien Fiquepron ;
- Université de Padoue (Italie) : Augusto Zanella.

fonctionnement des écosystèmes et leur capacité de résilience. Par exemple, la récolte par arbres entiers est une option qui tend à se généraliser comme opportunité de récolte mécanisée à faible coût. En général, ce type de récolte concerne surtout les premières éclaircies, opérations d'un grand intérêt sylvicole mais dont les produits ne sont guère rémunérateurs (bois énergie). Cependant, l'export de ce qui jusqu'alors restait au sol, les rémanents d'exploitation, peut affecter le fonctionnement des écosystèmes forestiers, notamment via ses impacts sur les sols et la biodiversité. En effet, les rémanents (essentiellement des branches de diamètre inférieur à 7cm et les feuillages) sont des compartiments riches en éléments nutritifs et leur présence au sol crée des habitats diversifiés. Identifier les sols capables de supporter durablement la récolte par arbres entiers est donc primordial pour permettre d'y rentabiliser les premières éclaircies et de garder un peu de latitude pour les sols qui ne pourraient pas supporter ce type de récolte.

Plusieurs projets de R&D ont fait progresser la compréhension des impacts des nouvelles pratiques de récolte sur les sols et explicité les connaissances nécessaires aux décisions souvent complexes qu'un gestionnaire forestier doit prendre (Fig. 1). Cet article fait un état des lieux des nouvelles connaissances et des nouveaux outils de diagnostic issus de ces projets, et décrit la démarche de transfert engagée à l'ONF.

Les nouvelles connaissances pour la préservation des sols forestiers

Connaissances pour la gestion raisonnée des exports d'éléments nutritifs

Depuis une dizaine d'années, l'ADEME finance de nombreux projets de R&D ayant pour objectif de comprendre et prévenir les impacts sur les sols et la biodiversité d'exports supplémentaires d'éléments nutritifs (récolte des menus bois, du feuillage et/ou des souches) et éventuellement y remédier (Departe, 2020).

Le projet Resobio (Landmann & Nivet, 2014) a démontré que la récolte des branches, des feuillages et/ou des souches impacte le plus souvent négativement les sols, les peuplements, la qualité des eaux et la biodiversité dans de nombreux écosystèmes forestiers à travers le monde (Achat *et al.*, 2015a). Cette récolte peut également diminuer les stocks de carbone du sol (Achat *et al.*, 2015b), alors que ce réservoir de carbone est essentiel dans la lutte contre les changements climatiques (Initiative "4 pour 1000"). Le projet a également permis de donner des estimations de la quantité d'éléments nutritifs contenue dans le bois en fonction de l'essence, du compartiment (tronc, branches, feuillage, racines et souches), de la biomasse sur pied et de l'élément considéré ; deux exemples sont donnés dans le tableau 1 et la figure 2, (Achat *et al.*, 2015a). Les estimations de quantités d'éléments exportés en fonction des compartiments récoltés ont été confrontées aux quantités d'éléments nutritifs disponibles dans les sols ou pouvant être apportés, par altération des minéraux du sol ou par des dépôts atmosphériques, sur différents

laps de temps. Des recommandations en termes d'export tolérable dans le cadre d'une gestion durable en sont issues et sont détaillées dans le guide issu du projet GERBOISE (Landmann, 2019).

La première des recommandations, la plus importante, est que les feuillages ne doivent pas être exportés quel que soit le type de sol. La chute et la décomposition des feuillages est un des processus clé du recyclage des éléments nutritifs dans le peuplement forestier. L'export de feuillages correspond à une réduction très importante des réserves en éléments nutritifs de l'écosystème, avec des conséquences fortes au moins à moyen terme (30 ans de recul) sur la productivité des peuplements forestiers (diminution de 7 % en moyenne) (Achat *et al.*, 2015a).

Concernant l'export de branches de moins de 7 cm de diamètre, c'est-à-dire les menus bois, les recommandations varient en fonction de la sensibilité des sols et des statuts de protection de la biodiversité (Landmann, 2019).

Pour approfondir nos connaissances sur les effets des récoltes de menus bois et feuillages sur les sols et peuplements en France, un réseau expérimental ambitieux d'INRAe teste quatre modalités d'export de matière organique (MOS) depuis 2013 (Akroume *et al.*, 2017). Les modalités sont, au moment de l'éclaircie : 1) export des menus bois, 2) export des menus bois et des litières (en fait, les litières sont soufflées une fois par an), 3) export des rémanents et apport compensatoire de cendres de chaufferies bois, et 4) témoin laissant au sol menus bois et litière. Ce réseau, qui sera suivi au moins sur une trentaine d'années, étudie 3 essences (chênes, hêtre et Douglas) sur 6 placettes réparties sur un gradient climatique. Les peuplements ont autour de 20-35 ans pour le Douglas et 30-60 ans pour les feuillus, ce qui correspond au

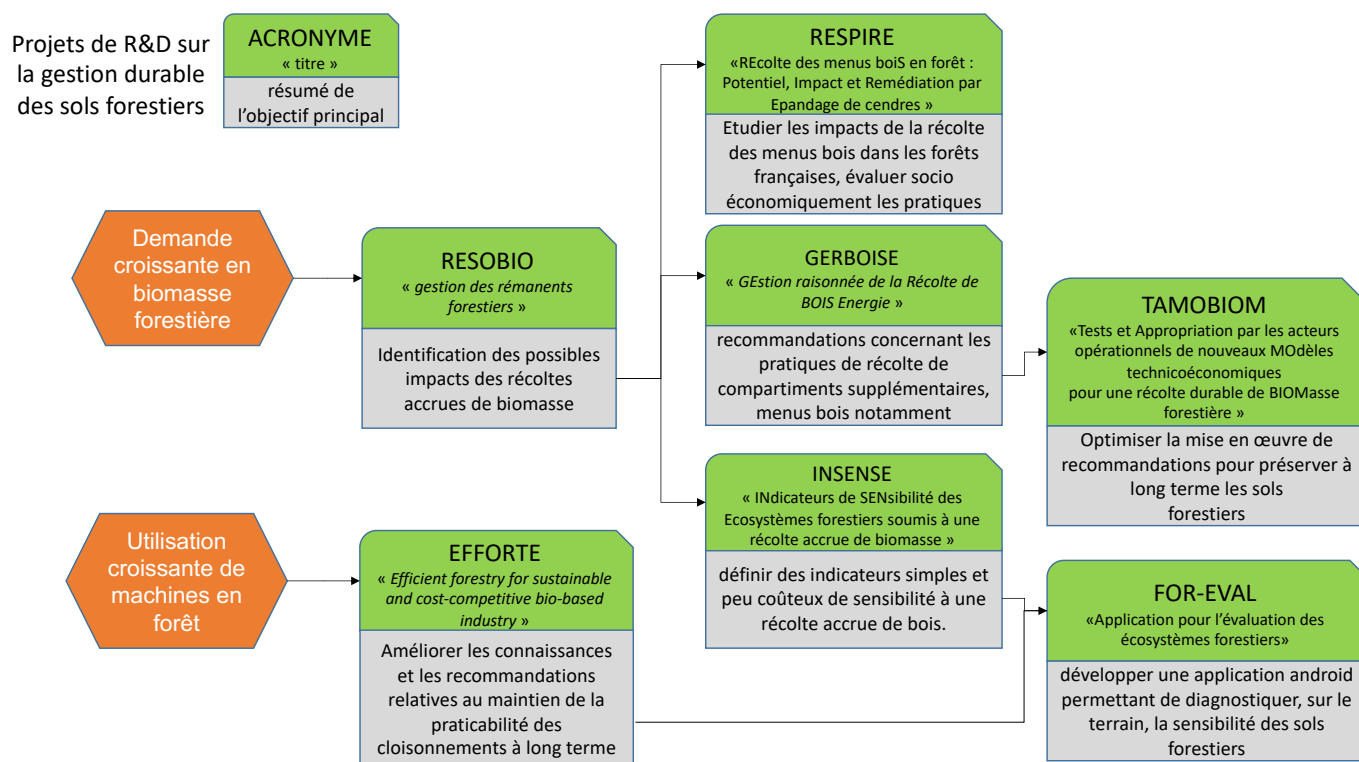


Figure 1. Les différents projets de R&D récents (>2012) en lien avec la gestion durable des sols forestiers.

Compartiment (trié par nombre croissant de compartiments inclus dans le modèle)	Modèle (pour le phosphore, en chênaie)	Nombre de mesures	Gamme de biomasse hors feuilles (domaine de validité en Mg ha ⁻¹)	Indice de confiance
tronc (bois)	$y = 0.4419 \times x^{0.6242}$	7	30-470	moyen
tronc (bois + écorce)	$y = 0.5721 \times x^{0.6974}$	26	10-470	fort
tronc (bois + écorce) + branches	$y = 0.9695 \times x^{0.7470}$	30	10-470	fort
tronc (bois + écorce) + branches + feuillages	$y = 2.4499 \times x^{0.5849}$	30	10-200	fort
tronc (bois + écorce) + branches + feuillages + racines	$y = 0.5419 \times x^{0.9450}$	11	70-300	moyen

Tableau 1. Estimation de stocks d'élément nutritif contenu dans les arbres : cas du phosphore pour les chênes

Le stock de phosphore contenu dans les arbres (y , en kg ha⁻¹) est calculé en fonction de la biomasse sur pied du peuplement (x en Mg ha⁻¹) ; pour d'autres essences et éléments nutritifs, se référer aux informations supplémentaires de Achat et al. (2015a)).

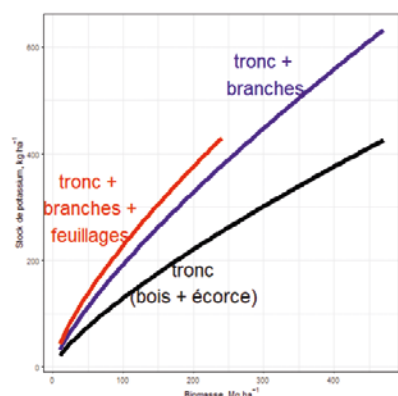


Figure 2. Stock d'élément nutritif contenu dans les arbres, estimé en fonction de la biomasse sur pied du peuplement pour les compartiments considérés : cas du potassium pour les chênes.

Pour d'autres essences et éléments nutritifs se référer aux informations supplémentaires de Achat et al. (2015a).

maximum de l'accroissement courant annuel. L'intérêt de l'expérience est d'intensifier à l'extrême les exports en éléments nutritifs, sachant qu'à ce stade les besoins en éléments nutritifs sont majoritairement couverts par les prélèvements dans le sol et non par le recyclage des litières. Le projet RESPIRE financé par l'ADEME (Saint-André, 2019) a mis en évidence sur ce réseau que les récoltes de matière organique ont peu ou pas d'effets sur les propriétés chimiques du sol après 3 ans mais il a montré un effet négatif des exportations extrêmes sur l'humidité et les activités microbiennes du sol. En particulier, certaines fonctions de mobilisation de l'azote et du phosphore par les champignons, ainsi que la richesse de certains taxons de la macro et méso-faune, sont significativement affectées et constituent des indicateurs précoces de l'altération du fonctionnement des écosystèmes. Les compensations réalisées par apports de cendres ne pallient pas les effets négatifs des exportations sur la richesse spécifique de la faune, voire appauvrissent les communautés de faune du sol, mais semblent restaurer certaines fonctions chimiques et limiter la lixiviation des métaux lourds (migration à travers le sol des métaux solubilisés dans l'eau) du fait de la légère augmentation du pH des eaux de drainage.

Connaissances pour la gestion raisonnée de la circulation d'engins en forêt

La circulation des machines en forêt modifie le fonctionnement des sols et des peuplements, dès les premiers passages et pour tous les types de sol. C'est pourquoi, en 2009, l'ONF a choisi de renforcer la protection des sols forestiers en forêts publiques en généralisant l'établissement de réseaux permanents de voies dédiées à la circulation au sein des peuplements : les cloisonnements d'exploitation (note de service ONF n° NDS-09-T-297). Le sol des cloisonnements est inévitablement tassé,

mais cette infrastructure protège le reste de la parcelle. Cependant, pour contenir efficacement la surface impactée par la circulation, **les réseaux de cloisonnements doivent rester praticables sur le long terme**, ce qui n'est pas simple dans un contexte de flux tendus. En effet, attendre que les cloisonnements soient secs pour pouvoir y circuler peut engendrer une perte de qualité des bois et mettre en difficulté les exploitants forestiers et/ou l'aval de la filière. L'organisation des chantiers doit tenir compte de cette probabilité de suspension.

De 2016 à 2019, l'ONF s'est engagé dans le projet collaboratif européen EFFORTE (Uusitalo, 2019), coordonné en France par FCBA, pour améliorer les connaissances et les recommandations relatives au maintien de la praticabilité des cloisonnements à long terme (Fig. 1). Les travaux des partenaires scandinaves ont conforté la classification de la sensibilité potentielle proposée dans le guide PROSOL (Pischedda, 2009). Les partenaires français et suisses ont étudié la dynamique de l'eau et de la portance (capacité d'un sol à une humidité donnée à « porter » l'engin) sur les cloisonnements, l'objectif à terme étant de **prédire la sensibilité dynamique des cloisonnements** pour optimiser l'organisation temporelle et spatiale des chantiers. La dynamique de l'eau sur les cloisonnements forestiers a pu être modélisée avec succès (Martin, 2019), mais cette modélisation nécessite encore des paramètres complexes à renseigner comme la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Des travaux de R&D complémentaires sont donc envisagés pour rendre accessibles les résultats des simulations au travers d'un nouveau projet de R&D déposé en 2020 à un appel à projets de l'ADEME, en partenariat avec INRAe, FCBA et Météo France.

Des chantiers suivis en forêt domaniale des Hauts-Bois (54) et en FD de Chaux (39) ont montré que **l'augmentation du poids des engins implique une augmentation des charges à la roue** plus ou moins forte selon la conception de la machine, ce qui entraîne des **impacts en profondeur** plus importants, ainsi que l'abaissement du seuil critique d'humidité à partir duquel l'orniérage commence. Cet effet de la charge à la roue s'exprime **indépendamment de la pression** (charge divisée par la surface de contact), laquelle influence surtout la déformation du sol en surface.

En milieu agricole, il a été prouvé que l'augmentation du poids des engins a causé une diminution drastique de la capacité d'infiltration et de rétention de l'eau en profondeur, exacerbant les risques de sécheresse et d'inondation (Keller et al., 2019). Le coût de ces impacts profonds (la surface du sol étant décompactée par un travail régulier) a été estimé à plusieurs centaines de millions d'euros par an pour la Suède.

En milieu forestier, la réduction de la surface circulée via l'implantation des cloisonnements est un moyen de limiter ces impacts, et il est essentiel d'arriver à empêcher la circulation hors des cloisonnements quelle que soit la sensibilité du sol. Cette tâche n'est pas aisée : par exemple, une quantification réalisée d'après un levé LIDAR aéroporté en FD de Compiègne montre que la surface impactée par les passages d'engins est en moyenne de 40 % malgré les cloisonnements, dont l'emprise ne représente que 20 % (pour des cloisonnements implantés tous les 20 m), et qu'elle peut atteindre 80 % (Mohieddine, 2019). D'après les images, on voit des traces de circulation entre les cloisonnements ; si certaines peuvent être antérieures à l'établissement des cloisonnements, beaucoup semblent correspondre à des sorties de cloisonnements (épis depuis les cloisonnements, traces reliant deux cloisonnements). C'est que la circulation d'engins modifie la dynamique de l'eau sur les cloisonnements, les rendant moins portants que le restant de la parcelle à exposition climatique équivalente (Martin, 2019). Plus le cloisonnement est orniéré, plus l'eau stagne en surface et moins il est portant. Limiter l'orniérage permet de maintenir la praticabilité des cloisonnements, d'éviter que les engins en sortent lors des prochaines exploitations et par conséquent de limiter la surface impactée. Dans l'attente des travaux de R&D complémentaires ayant pour objectif de rendre accessibles les prédictions d'humidité et de portance, **le diagnostic de sensibilité des sols proposé dans le guide PROSOL** (Pischedda, 2009) et repris dans le guide PRATIC'SOLS (Pischedda *et al.*, 2017) **reste pertinent** pour maintenir la praticabilité des cloisonnements à long terme (Fig. 3).

Le diagnostic PROSOL croise des critères statiques/stables dans le temps (pourcentage en éléments grossiers et texture) qui donnent la sensibilité potentielle au tassement et des critères dynamiques (humidité et profondeur d'apparition de la nappe) qui donnent la sensibilité en temps réel au tassement (Fig. 3). **Le diagnostic de sensibilité potentielle** retenu actuellement dans les prescriptions et outils de l'ONF n'utilise que la classe de texture, le pourcentage d'éléments grossiers et l'engorgement permanent (Fig. 3). Cela signifie que des sables ne présentant jamais d'engorgement temporaire (comme les dunes landaises) relèvent de la même catégorie, codée SOLPS, que des sables engorgés de manière temporaire (comme les Landes humides). De la même manière, les placages limoneux sur plateaux calcaires sont dans la même catégorie codée SOLSL que les placages limoneux de la plaine Lorraine qui sont sujets à engorgement temporaire. Pour compléter le diagnostic de sensibilité potentielle au tassement, il est possible de prendre en compte, en plus des critères précédemment cités, la présence de traces d'engorgement temporaire entre 0 et 50 cm de profondeur. Ce critère améliore l'estimation de la capacité de drainage des cloisonnements et par conséquent de la longueur des périodes où le cloisonnement sera praticable (Fig. 4). Dans tous les cas, **l'évaluation de la sensibilité réelle** au tassement (en temps réel, c'est-à-dire en fonction de l'humidité) reste à réaliser au moment de la circulation des engins de façon à prendre les mesures nécessaires pour garder impérativement les cloisonnements praticables.

Texture	État d'humidité*			
	Sol sec sur 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau à moins de 50 cm de la surface
Sol très caillouteux (Eléments grossiers > 50%)	SOLTC (7%)			SOL TS (1%)
Sol très sableux (sable > 70%)	SOLPS (15%)			
Argile dominante	SOLSA (21%)			
Limon dominant et sable limoneux	SOLSL (55%)			

Sol non sensible au tassement

Sol sensible = précautions nécessaires pour le passage d'engins

Sol très sensible et impraticable pendant une période de l'année = passage d'engins impossible

Code	Libellé de la prescription en interne	Libellé prescription externe (vente de bois sur pied, commande de prestation)
SOLTC	Sol très caillouteux : Sol praticable toute l'année	Sol praticable toute l'année
SOLPS	Sol très sableux : Prendre des précautions si sol humide. Si sol saturé en eau et non gelé, interdire la circulation des engins, même sur les cloisonnements. Si exploitation, disposer les rémanents sur les cloisonnements d'exploitation.	Sol praticable toute l'année moyennant certaines précautions lorsqu'il est humide
SOLSA	Argile dominante : Prendre des précautions si sol frais ou humide. Réduire la charge des engins et privilégier des pneus larges et tracks à tuiles larges. Si exploitation, disposer une couche de rémanents de 30cm d'épaisseur minimum sur le cloisonnement.	Sol praticable toute l'année moyennant certaines précautions lorsqu'il est frais ou humide
SOLSL	Limon dominant ou sable limoneux : Prendre des précautions lorsque le sol est frais. S'il est humide, ne pas intervenir. Réduire la charge des engins et privilégier des pneus larges et tracks à tuiles larges. Si exploitation, disposer une couche de rémanents de 30 cm d'épaisseur minimum sur le cloisonnement.	Sol sensible, praticable sous certaines conditions lorsqu'il est frais, mais impraticable lorsqu'il est humide
SOLTS	Nappe permanente à moins de 50 cm de profondeur : Intervenir uniquement par temps sec ou sur sol gelé. Réduire la charge des engins et privilégier des pneus larges et tracks à tuiles larges. Si exploitation, disposer une couche de rémanents de 30cm d'épaisseur minimum, débusquer par câble les produits éloignés et réaliser un abattage directionnel dans les zones non mécanisables.	Sol très sensible, impraticable toute l'année : conditions d'exploitation à valider par l'ONF

Figure 3. Diagnostic de sensibilité des sols au tassement proposé dans le guide PROSOL avec, en superposition, le diagnostic de sensibilité potentielle retenu par l'ONF (code) et le pourcentage de points de l'inventaire forestier national dans la catégorie concernée.

Le tableau donne l'explicitation des codes, utilisés dans les référentiels de gestion, et prescriptions correspondantes.

Texture	État d'humidité*			
	Sol sec sur 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau à moins de 50 cm de la surface
Sol très caillouteux (Éléments grossiers > 50%)				
Sol très sableux (sable > 70%)				
Argile dominante				
Limon dominant et sable limoneux				

■ Sol non sensible au tassement
■ Sol sensible = précautions nécessaires pour le passage d'engins
■ Sol très sensible et impraticable pendant une période de l'année = passage d'engins impossible

Éléments grossiers >50 %, pas d'engorgement temporaire
=> Cloisonnements praticables toute l'année avec peu de précaution

Sable sans engorgement temporaire ou éléments grossiers >50 %
avec engorgement temporaire
=> Cloisonnements praticables quasiment toute l'année avec
peu de précaution

Argile sans engorgement temporaire ou sable avec engorgement
temporaire
=> Cloisonnements praticables une partie de l'année

Limon et texture équilibrée sans engorgement temporaire ou argile
avec engorgement temporaire
=> Cloisonnements impraticables une grande partie de l'année

Limon et texture équilibrée avec engorgement temporaire ou sols
à engorgement permanent
=> Cloisonnements impraticables quasiment toute l'année

Figure 4. Diagnostic de sensibilité des sols au tassement proposé dans le guide PROSOL avec, en superposition (cadres colorés), le diagnostic de sensibilité potentielle prenant en compte la présence ou non de traces d'engorgement temporaire.

L'évaluation de la sensibilité réelle au tassement (en temps réel, c'est-à-dire en fonction de l'humidité) reste à réaliser au moment de la circulation des engins.

Boîte à outils de diagnostic des sols

Indicateurs de sensibilité à l'export d'éléments nutritifs

Le projet « INSENSÉ » piloté par ONF et INRAE, et financé par l'ADEME, a permis d'actualiser l'indicateur de sensibilité à l'export de menus bois du guide ADEME de 2006 (Cacot *et al.*, 2006), lequel était basé sur un classement des formes d'humus à dire d'expert. L'utilisateur pouvait également utiliser le pH au lieu des formes d'humus quand elles n'étaient pas déterminables sur le terrain. L'objectif d'INSENSÉ était de produire des indicateurs de sensibilité des sols à une récolte accrue de biomasse qui soient à la fois plus fiables, peu coûteux à établir, et faciles à utiliser sur le terrain (Augusto & Pousse, 2018).

Dans un premier temps, les publications scientifiques et techniques mondiales en lien avec la gestion raisonnée des exports d'éléments nutritifs en forêt ont été analysées afin d'en dégager les facteurs explicatifs de l'intensité des impacts observés. Ces facteurs sont très souvent déterminés et synthétisés à dire d'expert et sont rarement validés en conditions réelles. Quelques indicateurs quantitatifs existent, mais ils sont basés sur peu d'études, menées dans des contextes bien particuliers. Par exemple, les expérimentations en Finlande montrent que plus la litière est épaisse, moins les conséquences de la récolte des arbres entiers sur la fertilité sont fortes (Tamminen *et al.*, 2012). Cet indicateur ne peut s'appliquer tel quel en contexte tempéré où l'épaisseur de la litière est inversement corrélée avec la fertilité initiale du site (Ponge *et al.*, 2011). Au final, aucune propriété du sol, ni ensemble de propriétés, n'est ressorti de la littérature scientifique pour expliquer, dans tous les contextes, l'intensité des impacts suite à une récolte de menus bois et/ou feuillage.

En l'**absence d'indicateur universel**, il est apparu essentiel d'explorer les relations entre la fertilité exprimée par les peuplements (caractéristiques dendrométriques) et les propriétés des sols ; les déterminants chimiques de l'indicateur de fertilité « hauteur dominante à un âge donné » ont donc été analysés. Les résultats sont en apparence contradictoires : les peuplements sur sols acides et pauvres en éléments nutritifs montrent des fertilités en général plus élevées. À l'échelle nationale, ce constat peut s'expliquer par le contraste entre les sols du pourtour méditerranéen riches en éléments nutritifs et à pH élevés mais de productivité faible par rapport aux sols du nord, généralement pauvres en éléments nutritifs et à pH faible mais de productivité élevée. Pourtant à l'échelle des grandes régions écologiques le constat demeure. Même en modulant par la profondeur du sol (un sol acide est souvent un sol profond) et le stress hydrique, les plus fortes fertilités se trouvent sur sols acides, pauvres en éléments nutritifs. La clé de l'énigme se trouve dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques. Selon Legout *et al.* (2014), la faible richesse chimique du sol peut être révélatrice de la prépondérance des composantes biologique et/ou biochimique du cycle des éléments nutritifs. La composante biologique concerne les restitutions par les litières, la remobilisation des éléments par les plantes avant la sénescence des feuillages, etc. ; la composante biochimique est celle des transferts internes à la plante. Ainsi, **un sol avec peu de réserves peut connaître une forte productivité grâce au recyclage biologique intense des éléments nutritifs**, comme en forêt tropicale ; la gestion des exports d'éléments nutritifs y est alors cruciale. D'après les connaissances sur

les cycles biogéochimiques, **la couche de surface du sol est au cœur de ce recyclage d'origine biologique** (chute de litière et décomposition, prélèvement par les racines des éléments nutritifs ainsi libérés par les acteurs de la décomposition). **L'écosystème forestier est alors considéré comme sensible à un export supplémentaire de biomasse si la concentration en éléments nutritifs est faible dans cette couche de surface** (les 10 premiers cm du sol pour INSENSÉ). Des seuils de concentration ont été établis pour cet indicateur scientifique à partir de données expérimentales et de suivi de la nutrition des écosystèmes forestiers français. Le phosphore et le potassium sont les deux éléments pour lesquels on trouve le plus de sols forestiers ayant une sensibilité forte à l'export des menus bois, soit respectivement 35 et 45 % sur le réseau systématique représentatif des forêts françaises (réseau de suivi des écosystèmes forestiers de niveau I, à maille 16 x 16 km).

La dernière étape du projet a consisté à simplifier l'indicateur scientifique (concentration en éléments nutritifs de la couche 0-10 cm de profondeur), c'est-à-dire à le relier à des paramètres accessibles sur le terrain. Pour cela, une base de données harmonisées sur les sols forestiers, regroupant 7200 profils de sol sur l'ensemble du territoire métropolitain, a été constituée. Cette base a réuni et structuré quatre sources de données, dont il a fallu harmoniser les descriptions terrain (124 variables) et leur codification, ainsi que les analyses faites en laboratoire et leurs méthodes (13 032 échantillons de sol avec une vingtaine de méthodes différentes par échantillon pour les sources les plus complètes). Environ un an et demi de persévérance pour mettre en cohérence l'ensemble des données, les vérifier et les rendre utilisables pour la suite du travail... Ainsi la base de données a permis de mettre en relation des descripteurs de terrain avec les résultats des analyses de sol et les sensibilités qui en sont déduites selon l'indicateur scientifique. Les descripteurs les plus pertinents pour prédire les sensibilités par élément nutritif ont été sélectionnés et des clés de détermination ont été construites à partir de ces descripteurs (Durante *et al.*, 2019). Ces clés de détermination ne demandent que **cinq descripteurs terrain** : la grande région écologique, la forme d'humus, la classe de texture à 10 cm, la profondeur d'apparition des

carbonates dans la terre fine et la profondeur prospectable par les racines (jusqu'à 25 cm de profondeur) (voir le livret terrain : Augusto & Pousse, 2018). Elles **permettent de prédire les sensibilités pour les cinq éléments nutritifs majeurs** (calcium, magnésium, potassium, phosphore et azote). L'agrégation des sensibilités individuelles par élément nutritif donne la sensibilité globale utilisée pour connaître le niveau de recommandation GERBOISE qui s'applique au site diagnostiqué. La sensibilité globale se décline en 4 niveaux : faible, moyenne, partielle et forte. La **notion de sensibilité partielle** signifie que la sensibilité est **forte pour au moins un des éléments nutritifs et faible pour au moins un autre** élément nutritif. L'utilisateur peut alors suivre les recommandations GERBOISE associées à une sensibilité moyenne s'il juge le risque acceptable (par exemple sensibilité forte pour calcium, compensable par un apport de carbonates) ou les recommandations associées à une sensibilité forte s'il juge le risque trop élevé (par exemple sensibilité forte pour le phosphore).

La comparaison avec l'outil de diagnostic du guide ADEME (Cacot *et al.*, 2006) sur des jeux de données indépendants montre que l'outil INSENSÉ améliore fortement la détection des sols réellement sensibles et des sols réellement peu sensibles avec quasiment aucun faux positif et aucun faux négatif. **L'outil de diagnostic INSENSÉ apporte un diagnostic plus complet que l'outil de diagnostic du guide ADEME 2006**, notamment grâce à la prédiction des sensibilités pour le phosphore et l'azote. Cependant le pouvoir explicatif des descripteurs terrain pour ces deux éléments reste encore très mitigé par rapport au calcium, magnésium et potassium (Durante *et al.*, 2019).

Il est à noter qu'au vu des résultats du projet INSENSÉ, il est déconseillé d'utiliser l'outil de diagnostic du guide ADEME 2006 avec le pH bio-indiqué car il existe un décalage entre les valeurs du pH mesuré dans les sols et celles du pH indiqué par le relevé floristique (pH bio-indiqué), décalage qui induit un changement de classe de sensibilité (Fig. 5). Avec les pH bio-indiqués, on sous-estime souvent la sensibilité des sols à un export de menus bois.

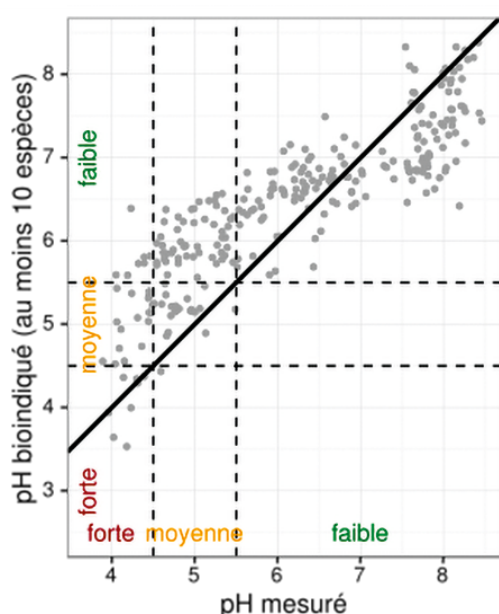


Figure 5. Relation entre le pH bioindiqué (e.g. estimé à partir d'un relevé floristique) et le pH mesuré dans le sol, avec le rappel des seuils de pH correspondant aux classes de sensibilité (forte, moyenne, faible) du guide ADEME de 2006.

Le décalage de valeur entre le pH bioindiqué (Pinto *et al.*, 2019) et le pH mesuré, notamment pour les pH mesurés ≤ 5.5 , implique un changement de classe de sensibilité (Une grande proportion de points ayant une sensibilité forte selon le pH mesuré ont une sensibilité moyenne selon le pH bioindiqué et une grande proportion de points ayant une sensibilité moyenne selon le pH mesuré ont une sensibilité faible selon le pH bioindiqué).

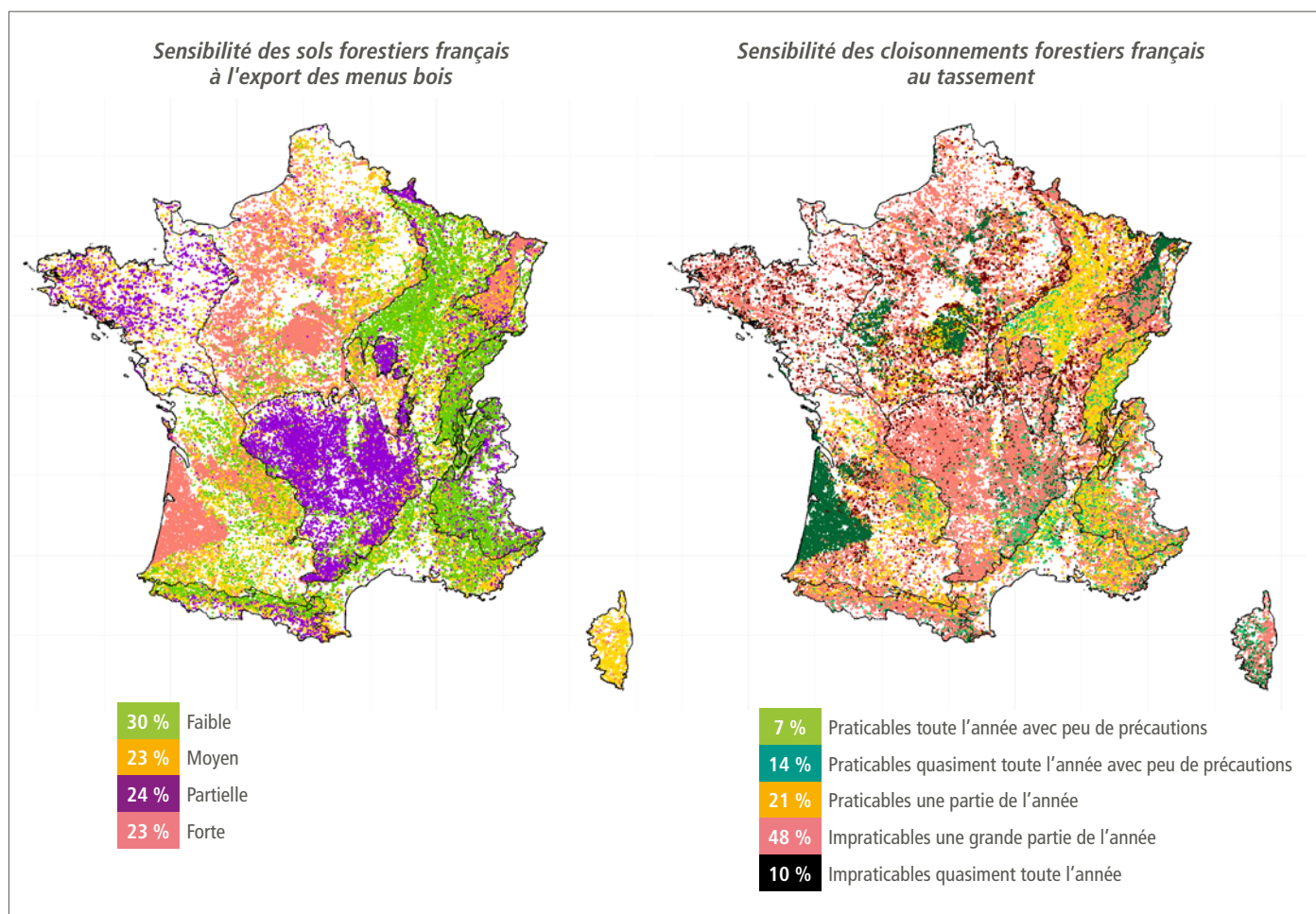


Figure 6. Cartes de sensibilité à l'export de menus bois (gauche) et de sensibilité potentielle au tassement (droite) selon l'outil de diagnostic INSENSÉ et le guide PROSOL, respectivement.

Diagnosics appliqués aux descriptions sol de l'IFN (campagnes d'inventaires 2005-2015, soit 1 point par km²). On voit que les sols limoneux du nord de la France sont à la fois sensibles à l'export de menus bois et au tassement.

Combiner les diagnostics pour la gestion raisonnée des menus bois et de la circulation des engins

Au-delà du problème des récoltes de menus bois, il peut y avoir plus généralement un conflit non encore résolu, en l'état actuel des connaissances, entre les recommandations concernant la préservation de la qualité physique des sols et celles concernant la préservation de leur qualité chimique. Quelle que soit leur sensibilité, la circulation des engins doit être concentrée sur les cloisonnements, dont il faut maintenir la praticabilité à long terme. Pour cela, le mieux est de ne circuler que lorsque les sols sont secs. Si cela n'est pas possible et si, par exemple, le chantier doit durer alors que les conditions météorologiques se dégradent, avoir concentré les rémanents sur les cloisonnements pour améliorer la portance peut éviter l'interruption. Mais très peu d'études quantifient le devenir des éléments nutritifs déposés sur les cloisonnements quand on les protège en y empilant les rémanents. Une étude allemande sur des peuplements d'épicéa (Borchert *et al.*, 2015) montre que les éléments nutritifs accumulés sous les branches déposées sur les cloisonnements peuvent être prélevés par la végétation, à condition que les racines puissent prospecter le sol sous les cloisonnements ; prospection qui est bloquée en cas de tassement. Cependant, même dans le cas où les rémanents

ont suffisamment protégé le cloisonnement du tassement pour que les racines arrivent à le prospecter, il est possible que les arbres ne puissent pas prélever les stocks d'éléments nutritifs apportés par les rémanents (Stutz *et al.*, 2017). La question du devenir des éléments nutritifs déposés sur les cloisonnements reste un front de science ouvert à l'heure actuelle.

En appliquant sur les données pédologiques de l'inventaire forestier national les diagnostics de sensibilité des sols au tassement (guide PROSOL) et à l'export de menus bois (projet INSENSÉ), on peut identifier les régions où le **conflit entre protection des cloisonnements et maintien de la fertilité chimique** de la parcelle va être prégnant (Fig. 6). Quand les sols sont à la fois sensibles à l'export de menus bois et au tassement, une attention particulière doit leur être apportée afin de limiter les risques de dégradation physique des cloisonnements et de dégradation chimique de la parcelle. On peut citer l'exemple des sols limoneux à engorgement temporaire, très productifs mais très sensibles d'un point de vue physique et chimique. Pour ces sols, les contraintes d'engorgement hivernal imposent d'exploiter en fin de printemps/début d'été lorsque les sols sont praticables, ce qui implique une exportation problématique des feuillages lors d'exploitation par arbres entiers, surtout dans les jeunes stades.

Le transfert des connaissances

Une brochure « Les clés pour agir » de l'ADEME est en préparation pour communiquer plus largement sur les préconisations établies dans le guide GERBOISE. Un projet de R&D financé par l'ADEME (TAMOBIO) étudie actuellement la faisabilité technique et la viabilité économique de méthodes alternatives de récolte permettant de suivre les préconisations établies dans le guide GERBOISE (Fig. 1).

Formations aux boîtes à outils

Au sein de l'ONF, le transfert des nouvelles connaissances et des boîtes à outils de diagnostic s'organise depuis l'automne 2019, auprès de référents des Directions Territoriales qui sont progressivement formés aux diagnostics terrain. Faire un état des lieux des sensibilités du sol et des pratiques mises en œuvre actuellement permet d'identifier les conséquences potentielles par Direction Territoriale et de faire évoluer certaines pratiques.

Les diagnostics de sensibilité des sols à un export de menus bois et au tassement peuvent s'appliquer à différentes échelles, en fonction des données disponibles.

À une échelle macroscopique, plutôt de l'ordre de la sylvoécocorégion, on peut regarder le pourcentage de points de l'inventaire forestier national se situant dans chacune des classes de sensibilité. Il est important de regarder par type de propriété car les sensibilités des sols peuvent différer entre les forêts privées et les forêts publiques (Tab. 2, exemple de la sylvoécocorégion « Bassin parisien tertiaire »). Cette première étape permet d'étudier la nécessité de réaliser des diagnostics locaux. Pour certaines sylvoécocorégions, le pourcentage de points est très proche de 100 % dans une des classes de sensibilité. Le diagnostic local n'y apparaît alors pas indispensable, sauf pour tester la méthode.

À l'échelle des massifs, si on dispose de catalogues de stations, il est possible d'utiliser les descriptions de sol « types » de ces catalogues pour calculer les sensibilités au tassement et à l'export de menus bois de chaque station (Picard, 2020 ; Da-Silva, 2020). Si on dispose de cartes de station, il sera possible de produire des cartes de sensibilités. Cependant, la qualité des informations disponibles sur le sol dans les catalogues de station est hétérogène (les éléments grossiers et la forme d'humus ne sont pas toujours renseignés par exemple) et ne permet pas toujours d'établir les diagnostics de sensibilité. De plus, ce sont le plus souvent des guides ou catalogues synthétiques qui sont utilisés sur le terrain et les regroupements de stations qui s'y trouvent ne sont pas toujours homogènes du point de vue de la sensibilité des sols.

For-Eval : une application d'aide aux diagnostics terrain

Dans les cas où l'approche par station ne permet pas de conclure ou dans le cas où aucune carte ni catalogue de station n'existe, un diagnostic de terrain est nécessaire. Pour le diagnostic de terrain, une application Android gratuite nommée For-Eval (Forêt et Évaluations) a été développée par INRAE, l'ONF et Thomas Bronner, informaticien indépendant (Fig. 7). Elle est disponible gratuitement sur le Play store Google et sur ONF store. Cette application aide à déterminer les paramètres clés sur le terrain et calcule la sensibilité à partir du relevé de terrain. Après avoir décidé de « Démarrer une évaluation », l'utilisateur peut choisir de réaliser un diagnostic de gestion durable ou un relevé de sol complet. Dans le premier cas, l'utilisateur sélectionne les diagnostics qu'il souhaite réaliser parmi les 4 proposés (Fig. 7a), renseigne les caractéristiques du site étudié (Fig. 7b) puis saisit les critères nécessaires au calcul du diagnostic (Fig. 7c). Dans le deuxième cas, l'utilisateur renseigne les caractéristiques du profil de sol puis celles des horizons (couches de sol homogène dans leurs propriétés). Dans les deux cas, l'application enregistre les critères relevés sur le terrain et calcule les diagnostics de sensibilité correspondant aux critères renseignés.

Les diagnostics disponibles concernent les **quatre sensibilités** suivantes :

- 1) à un export des menus bois (projet INSENSE),
- 2) au tassement (guide PROSOL),
- 3) à l'érosion hydrique, et
- 4) à la sécheresse (calcul du Réservoir en eau Utilisable, RU).

La sensibilité à l'érosion hydrique a été établie à partir des travaux existants et des connaissances de trois spécialistes de l'érosion (Frédéric Darboux, Sylvain Dupont et Yves Le Bissonnais, INRAE).

Le réservoir en eau utilisable est la quantité maximale d'eau disponible pour la végétation que le sol peut stocker. Il est estimé par horizon en fonction de sa classe de texture, de son pourcentage en éléments grossiers (éléments minéraux de plus de 2 mm) et de son épaisseur. La transformation de la classe de texture en millimètres d'eau disponible pour la végétation par cm de sol se fait via les coefficients les plus adaptés aux sols forestiers français en l'état des connaissances (Piedallu *et al.*, 2018). La somme des réservoirs utiles (RU) de chaque horizon sur l'ensemble de la profondeur prospectée par les racines donne le RU du point de relevé. La capacité du sol à stocker de l'eau est un élément déterminant de la gestion forestière en climat changeant car le RU peut être couplé à des données climatiques pour calculer l'intensité et la durée du stress hydrique.

La sensibilité au tassement a été scindée en sensibilité potentielle (d'après les critères de sol stables dans le temps, Fig. 4 et 7d) et sensibilité réelle

Nom de la sylvoécocorégion	Type de propriété	Nombre total de points IFN	Sensibilité à un export de menus bois				Sensibilité au tassement				
			faible	moyenne	partielle	forte	Très faible	faible	moyenne	forte	Très forte
B41 Bassin parisien tertiaire	Toutes forêts	1719	6 %	20 %	10 %	64 %	0 %	40 %	7 %	44 %	9 %
	Forêts domaniales	531	1 %	12 %	3 %	83 %	55 %	6 %	29 %	10 %	31 %

Tableau 2. Pourcentage de points de l'IFN par classe de sensibilité et type de propriété (campagnes d'inventaires 2005-2015). Pour la sylvoécocorégion « Bassin parisien tertiaire », le pourcentage de points de sensibilité forte est plus élevé en forêt publique qu'en forêt privée.

a) Écran de démarrage d'une évaluation « Diagnostic de gestion durable » : l'utilisateur peut choisir entre 4 diagnostics.

b) Écran de renseignements sur le site observé : on peut enregistrer les coordonnées GPS (GPS du smartphone) ou saisir ses coordonnées manuellement ou ne pas enregistrer de coordonnées ou choisir de s'entraîner.

c) Écran de saisie des critères terrain du diagnostic de sensibilité à un export de nutriments (projet INSENSE).

d) Écran de saisie des critères terrain du diagnostic de sensibilité au tassement (guide PROSOL).

e) Écran d'aide à la détermination de la classe de texture : l'utilisateur est guidé dans la clé de détermination avec des images et des textes (ici texte court).

f) Écran d'aide à la détermination de la classe de texture : ici le texte court a été développé pour faire apparaître l'explication correspondante.

Figure 7. Fonctionnement de l'application For-Eval (copies d'écran).

(fonction de la sensibilité potentielle et de l'humidité des sols). Dès que l'utilisateur a saisi les critères de la sensibilité potentielle, l'application affiche une aide à la détermination de l'humidité spécifique à la classe de texture choisie. Saisir l'humidité du sol n'est pas obligatoire. Pour retrouver la sensibilité potentielle retenue actuellement dans les prescriptions et outils ONF (diagnostic qui ne tient pas compte de la présence de traces d'engorgement temporaire, Fig. 3), il suffit de répondre « non » à la question « Est-ce que des traces d'engorgement temporaire s'observent entre 0 et 50 cm de profondeur ? ».

L'application *For-Eval* dispose de modules d'aide à la description des formes d'humus et de la classe de texture (Fig. 7e et f) ; à travers des photos et des textes, l'utilisateur est guidé dans les clés de détermination pour choisir la forme d'humus et la classe de texture correspondantes. L'aide à la description des formes d'humus est basée sur l'application *TerrHum* (Zanella *et al.* 2020), simplifiée pour correspondre au diagnostic de sensibilité des sols forestiers français à un export des menus bois. Des photos et textes aident également à choisir la situation de pente, de structuration et recouvrement de la végétation, de présence/absence de carbonates dans la terre fine, de présence de traces d'engorgement temporaire. L'application peut trouver la grande région écologique (GRECO) grâce aux coordonnées GPS du téléphone (Fig. 7c).



Conclusion

Différents projets de R&D sur la gestion durable des sols forestiers nous ont permis de progresser dans l'évaluation quantitative de leur résilience face à des évolutions environnementales rapides, comme les évolutions des pratiques et les changements climatiques. La constitution d'une base de données harmonisées sur les sols forestiers français a été une des briques essentielles à la création des diagnostics d'évaluation des sols sur le terrain. L'application *For-Eval* permet en retour d'alimenter cette base de données avec des relevés terrain. Cette alimentation se faisant sur la base du volontariat, **une des perspectives** d'amélioration de notre capacité à évaluer la résilience des sols forestiers français repose sur la réussite de cette démarche de science participative.

En termes de projets R&D à moyen terme, les futurs fronts de progrès concernent l'élaboration d'un outil de prédiction de la sensibilité au tassement en temps réel grâce aux données météorologiques et l'étude de la faisabilité technique et de la viabilité économique de méthodes alternatives de récolte permettant de suivre les préconisations établies dans le guide GERBOISE (projet TAMOBIOM). Avec ce projet, un travail plus approfondi s'est engagé avec ONF-Energie pour cibler les récoltes en feuilles et trouver des solutions pour les éviter au maximum (Couette, 2020).

En termes d'appropriation en interne, les résultats du guide GERBOISE seront, à court terme, introduits dans notre référentiel de prescription. Les formations territoriales permettront de créer des réseaux de référents à mobiliser sur les questions de résilience des sols. Enfin, la réflexion sur l'intégration des outils de diagnostic dans notre système d'information sera menée pour une mise en application plus homogène.

L'environnement change et nos pratiques doivent constamment s'adapter à ces changements. Dans ce contexte, les connaissances, les outils et les recommandations à destination des gestionnaires doivent régulièrement évoluer.

Références

- Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L., 2015a. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, vol. 348 pp. 124–141
- Achat D.L., Fortin M., Landmann G., Ringeval B., Augusto L., 2015b. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports*, 5(1)
- Akroume E., Zeller B., Buée M., Saint-André L., Reichard A., Gehin C., Bach C., 2017. Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers. *Rendez-Vous Techniques* n°54, pp. 9–21
- Augusto L., Pousse N. (coord.), 2018. INsensé : Indicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. ADEME. 262p. (<https://www.ademe.fr/insense-indicateurs-sensibilite-ecosystemes-forestiers-soumis-a-recolte-accrue-biomasse>)
- Livret terrain du projet INSENSÉ : https://www.ADEME.fr/sites/default/files/assets/documents/insense_indicateurs-sensibilite-ecosystemes-forestier-2018-outil.pdf
- Borchert H., Huber C., Göttlein A., Kremer J., 2015. Nutrient concentration on skid trails under brush-mats – Is a redistribution of nutrients possible? *Croatian Journal of Forest Engineering*, vol. 36(2) pp. 243–252
- Cacot E. (coord.) 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. ADEME / AFOCEL / IDF / UCFF / INRA. 36p. (<https://www.ademe.fr/recolte-raisonnee-remanents-foret>)
- Couette A., 2020. Analyse des exports de feuillage dans les chantiers ONFE : analyse de sensibilité des exportations par type de récolte et identification de méthodes alternatives. Rapport de stage de Master Agrosociétés, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt. 109p.
- Da Silva Afonso E., 2020. Indicateur de sensibilité des sols forestiers au tassement et aux exportations de minéralomasse. Rapport de stage de Master SEME. AgroSup Dijon - Université de Bourgogne. 62p.
- Departé A., 2020. Préserver la fertilité des sols forestiers. *Forêt Entreprise* n° 252 pp. 30–33
- Durante S., Augusto L., Achat D.L., Legout A., Brédoire F., Ranger J., Seynave I., Jabiol B., Pousse N., 2019. Diagnosis of forest soil sensitivity to harvesting residues removal – A transfer study of soil science knowledge to forestry practitioners. *Ecological Indicators*, vol. 104 pp. 512–523
- Initiative "4 pour 1000" (<https://www.4p1000.org/fr>. Accessed: 4/6/2020).
- Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, vol. 194
- Landmann G. (coord.), 2019. Portail Gerboise. (<http://www.gip-ecofor.org/gerboise/index.php?sujet=1>)
- Landmann G., Nivet C. (coord.), 2014. Projet RESOBIO. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. ADEME, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, GIP Ecofor. 243p. (<https://www.ademe.fr/projet-resobio-gestion-remanents-forestiers-preservation-sols-biodiversite>)
- Legout A., Hansson K., van der Heijden G., Laclau J.-P., Augusto L., Ranger J., 2014. Chemical fertility of forest soils: basic concepts. *Revue Forestière Française, Special Issue, "REFOR 2013 WORKSHOPS-Is the management of forest soil fertility at a turning point?"* pp. 21–31
- Martin M., 2019. Développement d'un modèle de transfert hydrique des sols forestiers partiellement tassés dans un contexte de données parcimonieuses. Thèse de doctorat. Avignon Université. 260p. (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02518560>)
- Mohieddin H., 2019. Impact du tassement actuel et ancien par les engins sylvicoles sur les pédosystèmes et la végétation. Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne. 184p.
- Picard J., 2020. Étude de la sensibilité des sols à l'export de rémanents dans les forêts de la région Grand Est. Rapport de césure. BordeauxSupAgro. 33p.
- Piedallu C., Pousse N., Bruand A., Dietz L., Fiquet J., 2018. Estimer le réservoir en eau des sols - Quelles fonctions de pédotransfert le forestier doit-il utiliser ? *Forêt Entreprise*, 242, 28–32.
- Pinto P., Dupouey J.-L., Gégout J.-C., Hervé J.-C., Legay M., Montpied P., Piedallu C., Pousse N., Wurpillot S., 2019. Faut-il des relevés de flore exhaustifs pour caractériser et cartographier l'acidité et les propriétés nutritionnelles des sols ? *Rendez-Vous Techniques*, n° 61–62 pp. 71–84
- Pischedda D. (coord.), 2009. Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt "PROSOL." ONF / FCBA. Paris. 110p. (<https://www.onf.fr/onf/lonf-agit/+18b::prosol-guide-pour-une-exploitation-forestiere-respectueuse-des-sols-et-de-la-foret.html>)
- Pischedda D., Helou T.E. (coord.), 2017. Guide sur la praticabilité des parcelles forestières PRATIC'SOLS. ONF / FNEDT. Paris. 46p. (<https://www.onf.fr/produits-services/+192::pratic-sols-guide-sur-praticabilite-des-parcelles-forestieres.html>)

Ponge J.-F., Jabiol B., Gégout J.-C., 2011. Geology and climate conditions affect more humus forms than forest canopies at large scale in temperate forests. *Geoderma*, vol. 162 pp. 187–195

Saint-André L. (coord.), 2019. RESPIRE - Récolte des menus bois en forêt. ADEME, 114p. (<https://www.ademe.fr/respire-recolte-menus-bois-foret>)

Stutz K.P., Schack-Kirchner H., Kändler G., Landes L., Linz M., Warlo H., Lang F., 2017. Available nutrients can accumulate in permanent skid trails. *Forests*, vol. 8(2)

Tamminen P., Saarsalmi A., Smolander A., Kukkola M., Helmisaari H.-S., 2012. Effects of logging residue harvest in thinnings on amounts of soil carbon and nutrients in Scots pine and Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, vol. 263, pp. 31–38

Uusitalo J. (coord.), 2019. EFFORTE Home. EFFORTE, (<https://www.luke.fi/efforte/>)

Zanella A., Zanella G., Bronner T., Pousse N., 2020. TerrHum. Issu de: Humusica App. *Soil Ecol. Special issues* vol. 122a, 122b (2018), Articles 4, 5, 6, 9, 10, 13 : <https://www.journals.elsevier.com/applied-soil-ecology/special-issues> et *Soil Sci. Soc. Am. J.* (2019) : <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0279>. Android version: Bronner T., TerrHum, Google Play, Education; original iOS application: Zanella A., TerrHum, App Store, Education.



© Noémie Pousse / ONF

RENOUVELLEMENT PAR TROUÉES EN MONTAGNE : PRÉPARER LE SOL

© Laurent Malabeux, ONF

DOSSIER

Pour assurer le renouvellement des futaies irrégulières en montagne, comment faciliter l'acquisition de la régénération dans les trouées ?

Ce dossier rend compte des études réalisées ces dernières années dans les forêts publiques des Alpes du Nord afin de trouver des solutions aux difficultés de renouvellement des peuplements résineux d'altitude.

16 Le travail du sol en montagne :

enjeux, expérimentations passées et pratiques actuelles

Par Léa Veuillen, Laurent Malabeux, Catherine Riond et Didier Cornevin

22 Le travail du sol, ça marche !

Retours d'expérience et mesures sur des chantiers récents des Alpes du Nord

Par Léa Veuillen, Laurent Malabeux, Catherine Riond et Didier Cornevin

28 De l'innovation en montagne :

une méthode de travail du sol avec un outil adapté

Par Laurent Malabeux, Catherine Riond et Didier Cornevin

35 Régénération naturelle sur bois mort :

une alternative à la plantation et au travail du sol

Par Didier Cornevin, Laurent Malabeux et Catherine Riond

LE TRAVAIL DU SOL EN MONTAGNE : ENJEUX, EXPÉRIMENTATIONS PASSÉES ET PRATIQUES ACTUELLES

Léa Veuillen^{(1) (2)}, Laurent Malabeux⁽³⁾, Catherine Riond⁽³⁾, Didier Cornevin⁽⁴⁾

(1) Stage AgroParistech/ONF, pôle RATD Annecy

(2) INRAE Aix-Marseille – UMR RECOVER

(3) ONF – pôle RDI Chambéry

(4) ONF – Agence Savoie

Les forêts de montagne assurent de multiples fonctions : production de bois, protection contre les risques naturels, hébergement de la biodiversité, paysage, loisirs... Les importantes variations de climat, d'altitude, de pente et d'exposition engendrent en outre une grande diversité des peuplements forestiers, de leurs essences et de leur structure.

Dans les formations forestières productives montagnardes et subalpines, les principales essences-objectifs sont l'épicéa, le mélèze et le sapin qui peuvent être accompagnés de pin cembro, de pin sylvestre ou de pin à crochet. Les conditions climatiques y sont très dures et rendent très complexe le renouvellement des peuplements. En effet, le jeune semis se voit confronté à de nombreuses difficultés : un rayonnement exacerbé en adret et insuffisant en ubac, un enneigement conséquent et une période de végétation courte, de violents épisodes de précipitations couplés à une pente souvent raide, des températures basses toute l'année.

De ce fait, la régénération naturelle a une dynamique très lente en montagne, à tel point qu'elle peut parfois paraître bloquée à une échelle de temps humaine (Fuhr *et al.*, 2015). Si l'analyse des cycles naturels tend à montrer que la régénération finit toujours par s'installer, l'état sanitaire de certains peuplements, la décapitalisation parfois avancée, et l'ambition de maintenir une récolte soutenue de bois en montagne incitent parfois à mettre en œuvre des techniques accélérant cette dynamique naturelle, afin d'assurer la pérennité des différentes fonctions de la forêt.

L'analyse des contextes présentant des difficultés de régénération et des surfaces concernées a conduit les gestionnaires de forêts publiques à s'interroger sur les solutions techniques à proposer en termes de travaux. Un état des connaissances, des pratiques et des expérimentations

est apparu nécessaire en premier lieu, afin de proposer des solutions réalistes et économiquement acceptables. Cet article se concentre ainsi sur les techniques de travail du sol : Que peut-on tirer des nombreuses expérimentations qui ont été menées sur le sujet ? Quelles sont les pratiques actuelles en matière de travail du sol ?

Importance des surfaces concernées par les difficultés de régénération

À l'échelle des Alpes du Nord, de nombreux gestionnaires expriment depuis plusieurs années leurs craintes au sujet de la réussite de la régénération naturelle, mises en lumière depuis la mise en place d'itinéraires de renouvellement par trouées. Dans ce contexte, le pôle RDI de Chambéry et l'agence territoriale de Savoie ont mené une analyse sur l'état de la régénération dans le département, d'après les informations recueillies à l'occasion des révisions d'aménagement (sur la période 2004 à 2016), afin de définir les actions de recherche et de développement à mettre en œuvre.

Sur un jeu de données correspondant à 23 384 ha de surfaces en sylviculture aux étages montagnard et subalpin, il ressort (Fig. 1) que parmi les peuplements dont le capital sur pied peut permettre l'installation de la régénération ($G < 25 \text{ m}^2$), ce sont les peuplements d'épicéas dans des contextes stationnels frais ou drainés légèrement acides qui présentent le plus de difficulté de régénération (Fig. 1). Ainsi, sur 3934 ha, la régénération a été estimée, à dire d'expert, insuffisante ou absente.

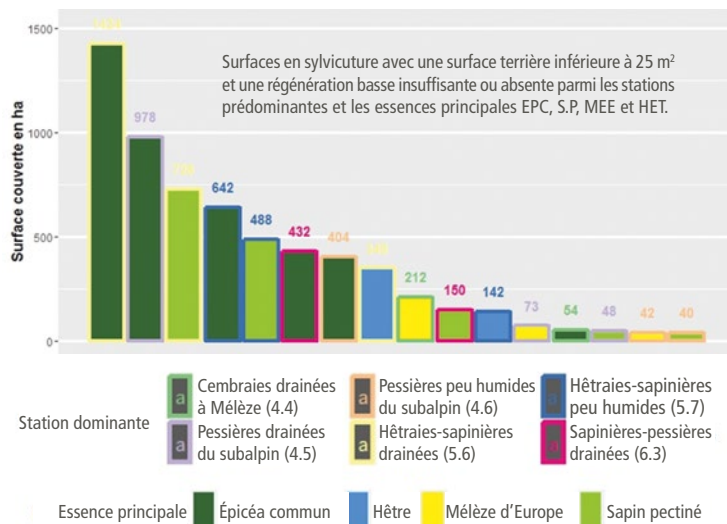


Figure 1. Surfaces en difficulté de régénération selon les stations prédominantes et les essences principales dans les peuplements faiblement capitalisés en Savoie.

Données recueillies lors de la phase de description préalable à la révision des aménagements sur la période 2004 à 2016.

Les résultats de cette analyse, réalisée à l'échelle d'une agence seulement mais qui est a priori représentative de la situation dans les Alpes du Nord, ont montré l'importance des surfaces concernées et la nécessité de mettre en place un plan d'actions visant à proposer rapidement des solutions aux gestionnaires.

La sylviculture par trouées, une première réponse aux contextes contraignants de montagne

L'ouverture de trouées sylvicoles apporte chaleur, lumière et eau aux semis. Elle crée ainsi des conditions propices à l'installation de nouveaux semis et au développement des préexistants, à condition que les trouées soient correctement orientées et dimensionnées. Cette pratique a été formalisée dans le Guide de Sylviculture de Montagne (GSM) des Alpes du Nord (Gauquelin et Courbaud, 2006).

Outre l'objectif de renouvellement des peuplements, la sylviculture par trouées permet également de prendre en compte la complexité de l'exploitation en contexte de pente, et de faciliter la récolte de bois tout en réduisant considérablement les dégâts aux arbres de la matrice du peuplement.

Cependant, il peut arriver que l'ouverture d'une trouée ne suffise pas à enclencher la régénération, ou du moins pas aussi vite que le forestier le souhaiterait. En effet, la mise en lumière peut accentuer le développement d'une végétation concurrente herbacée et arbustive monopoliste (callune, fougère aigle, molinie en sont des exemples à l'échelle nationale). Dans les Alpes, il s'agira plutôt de la framboise, des hautes herbes ou de graminées qui colonisent l'espace disponible au détriment des semis. Ces espèces se développent déjà à des taux de recouvrement conséquents pour un éclaircissement relativement faible et pas seulement en cas de fort éclaircissement (Gaudio *et al.*, 2011). En leur présence, il n'est donc pas recommandé d'ouvrir le peuplement sans accompagner cette action de travaux (installation de bois mort, travail du sol, plantation).

La concurrence herbacée s'atténue naturellement au bout d'un certain temps, permettant le développement d'arbustes et d'essences feuillues pionnières (sorbier, tremble, bouleau, aulne, saule...) qui favorisent ensuite les semis d'épicéa (Duchaufour, 1953) (Angst *et al.*, 2001). Mais cette évolution naturelle prend du temps : une étude suisse montre que moins de 50 % des trouées suivies ont atteint les valeurs-cibles de régénération 25 ans après ouverture (Streit *et al.*, 2009).

Par ailleurs, en contextes stationnels non contraignants, la vitesse de fermeture des trouées est plus faible au subalpin (40 ans) qu'au montagnard (20-25 ans) (Fuhr *et al.*, 2015). En revanche, en conditions plus difficiles du montagnard, la vitesse de fermeture des trouées est la même que celle du subalpin dans de bonnes conditions de croissance. On peut alors penser à des situations de blocage.

Un panel de solutions envisageables pour lever les blocages de régénération

L'ouverture d'une trouée sylvicole peut donc être couplée à des travaux s'il n'y a pas de semis acquis et si les choix de gestion impliquent de ne pas pouvoir attendre plusieurs décennies :

- **le travail du sol**, qui consiste ici à supprimer la végétation concurrente et les limitations édaphiques (sécheresse et épaisseur de la couche organique superficielle) en décapant ou en scarifiant le sol.
- **l'installation sur le sol de bois morts**, qui constituent des microsites à l'abri de la concurrence de la végétation, où la neige demeure moins longtemps, et sont ainsi propices à la régénération (Garet, 2017).
- **la régénération artificielle par plantation**, technique très utilisée dans un but de protection (forêts RTM), souvent remise en cause aujourd'hui du fait de la pression forte des cervidés.

À partir des connaissances actuelles et des besoins exprimés par les gestionnaires, plusieurs axes de travail ont été identifiés avec le pôle RDI :

- réaliser une recherche bibliographique afin de s'appuyer sur les expérimentations et observations passées, pour établir si possible un référentiel (technique et outil) sur le travail du sol en contextes de pentes,
- en parallèle, analyser les chantiers de travail du sol réalisés en Savoie et documentés depuis plusieurs années pour conforter ce référentiel et l'ancrer dans les contextes rencontrés localement,
- réfléchir à l'adaptation des outils et matériels utilisés en plaine aux contextes de forte pente, afin de faciliter la mise en œuvre des travaux,
- proposer des méthodes alternatives au travail du sol
- mieux documenter la méthode d'installation des trouées.

Les 2 premiers axes ont été confiés à Léa Veuillen, dans le cadre de son stage de fin d'études AgroParisTech, et les résultats sont présentés respectivement ci-après et dans l'article suivant. Le pôle Recherche, Développement et Innovation (RDI) et le Réseau d'Appui Technique et de Développement (RATD) Auvergne-Rhône-Alpes ont travaillé sur l'adaptation des outils et les méthodes alternatives, sujets également présentés dans ce dossier. La méthode d'installation des trouées fait encore l'objet de travaux de R&D afin d'apporter des outils d'aide aux gestionnaires ; les résultats seront présentés dans un prochain numéro des *RenDez-Vous techniques*.



Le travail du sol : enseignements des multiples expérimentations et observations passées

L'inquiétude des gestionnaires quant au renouvellement des peuplements d'altitude ne date pas d'hier, et le travail du sol constitue une solution technique qui a déjà été explorée dans le passé par de nombreuses expérimentations et observations. Quel bilan pouvons-nous dresser de ces essais ?

À notre connaissance, il y a eu ces dernières décennies une vingtaine d'expérimentations et observations de chantiers de travail du sol, en majorité dans les Alpes du Nord.

Une grande part des expérimentations a été réalisée par la STIR (Section Technique Inter-Régionale, ancien pôle Recherche, Développement et Innovation de l'ONF) dans les années 1980-90. Il faut distinguer ces expérimentations des observations conduites par ailleurs sur des chantiers réels : les premières sont rigoureuses et bien documentées mais souvent réalisées sur des très petites surfaces et entraînant un effet microsite important ; les secondes concernent de plus grandes surfaces dans de nombreux sites mais sont souvent moins documentées.

Les conclusions principales des différentes études sont résumées ici selon l'essence-objectif considérée (pour le bilan exhaustif, voir le mémoire de fin d'études (Veuillen, 2018)).

Notons que dans les expérimentations comme dans les observations, les termes utilisés pour décrire le travail du sol sont assez variés, sans une description précise des modalités et des résultats. On parle ainsi parfois indifféremment de crochitage, de décapage, de travail du sol sans qu'il soit toujours facile de distinguer les différentes modalités. À défaut de plus de précisions, dans les présentations ci-après, les termes repris sont toujours ceux utilisés dans les comptes-rendus des opérations (voir aussi le lexique).

Décapage pour l'épicéa dans les Alpes du Nord

Les quatre expérimentations et trois observations que nous avons pu retracer pour l'épicéa ont toutes été réalisées dans les Alpes du Nord, dans des pessières à myrtille et/ou à hautes herbes, contextes stationnels très contraignants mais plus marginaux en surface. Cela témoigne néanmoins de la préoccupation des forestiers alpins pour la régénération des pessières.

D'après ces essais, un décapage ou crochitage après ouverture d'une trouée semble être une bonne solution pour favoriser l'installation des semis d'épicéa dans ces contextes particuliers, notamment en adret.

Deux expérimentations STIR ont été réalisées à la fin des années 1980, concluant à l'effet bénéfique, après une dizaine d'années, du travail du sol sur la régénération de l'épicéa (Fig. 2 et 3). Le travail du sol consistait, soit en un décapage seul, soit la mise en place de micro banquettes qui, en plus de l'action décapante, ont pour objectif de casser la pente et de limiter ainsi les problématiques liées à l'érosion.

Travail du sol et renouvellement en montagne : lexique

Les définitions s'appuient sur le Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Nord (dit GSM ; Gauquelin et Courbaud, 2006) et sur l'ouvrage intitulé « Vocabulaire Forestier » (Bastien et Gauberville., 2011)

Banquette : aplanissement ponctuel de la pente, permettant de former des rectangles (de dimensions variables en fonction de la taille du godet / de la surface piochée) dans lesquels le sol est donc décapé et horizontal.

Cellule de régénération : ensemble de tiges de fourrés et gaules dont au moins une d'avenir (parfois un seul individu), correspondant à la surface occupée par une perche de classe de diamètre 10 ou 15 cm (environ 6 m²).

Crochetage : terme générique utilisé dans les différentes études et expérimentations STIR pour parler du travail du sol (scarification, décapage...).

Décapage (= écroûtage) : retrait de toutes les couches supérieures organiques du sol (humus) et de la végétation.

Essence-objectif : espèce d'arbre à favoriser dans un peuplement pour répondre aux objectifs fixés dans les documents de gestion durable.

Régénération : (1) processus de renouvellement naturel ; (2) ensemble des semis et tiges de fourrés présents sur une surface donnée.

Scarification = griffage : fragmentation mécanique de l'humus et ameublissement superficiel du sol par griffage de surface (10-15 premiers cm). Entraîne le mélange des horizons superficiels. La végétation est retirée.

Semis (= semis non acquis) : individu issu de graine de hauteur inférieure à 50 cm.

Semis acquis (= viable) : régénération jugée viable et en quantité suffisante pour participer au renouvellement du peuplement forestier. La station lui convient et son développement n'est pas mis en cause par des facteurs externes (gibier). N'est pas considéré comme viable un semis dont la forme ou la vigueur lui ôte toute chance de jouer un rôle dans le futur peuplement.

Semis-objectif : semis d'une des essences-objectifs du peuplement.

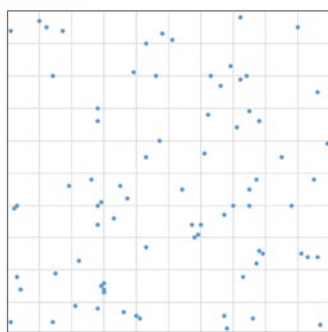
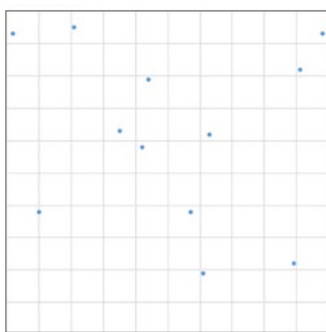
Zone travaillée - Densité de semis sur 100 m²Zone témoin - Densité de semis sur 100 m²

Figure 2. Essai 86-19-08 (FC des Avanchers), 12 ans après travaux : densité de 7 800 semis/ha sur la zone travaillée (banquettes réalisées à la pioche, à gauche) contre 1 200 semis/ha pour le témoin (à droite)

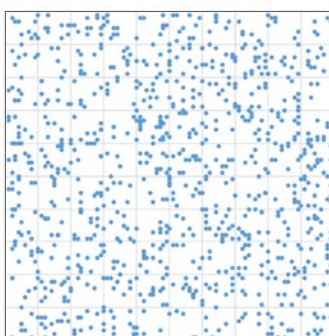
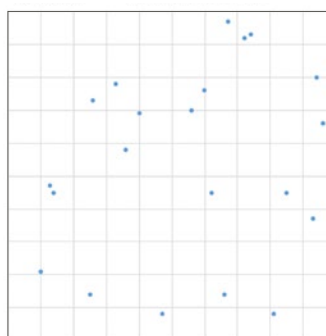
Zone travaillée - Densité de semis sur 100 m²Zone témoin - Densité de semis sur 100 m²

Figure 3. Essai 87-19-04 (FC de Cohennoz), 12 ans après travaux : densité de 95 500 semis/ha sur la zone travaillée (décapage de 15-20 cm superficiels au godet, à gauche) contre 2 250 semis/ha pour le témoin (à droite).

Un essai de crochetage a également été mis en place en Savoie au même moment, sans résultat probant (Pellissier, 1992) puisque le taux de germination est proche de zéro ; mais le suivi n'a été effectué que les 3 premières années après travail du sol, période durant laquelle la densité de semis peut énormément varier, leur mortalité étant très importante (Brang, 1998) (Picard, 1994) (Gapin, 1999) (Camaret, 1997). De plus, il semble que cet essai ait été réalisé sous couvert.

Chez nos voisins suisses, P. Brang (1998) a conclu après expérimentation à une amélioration des conditions de germination et survie des jeunes semis après décapage, particulièrement en stations sèches.

Trois observations de chantiers existants viennent conforter les résultats des expérimentations :

- P. Fourchy, dans les années 50, avait observé en Suisse « l'heureux effet » de l'écroûtage (« couverture vivante soulevée et roulée comme un tapis ») sur l'installation des semis dans les quelques années qui ont suivi les travaux (Fourchy, 1953).
- S. Camaret a conclu à un impact positif du crochetage de l'humus dans des trouées sylvicoles en Savoie, après avoir observé au bout de 10 ans 7 fois plus de semis sur sol travaillé que sur sol témoin (Camaret, 1997)
- et enfin P. Gensac observe une très bonne régénération de l'épicéa sur les sols décapés pour la création de pistes de ski (Gensac, 1989).

Décaper pour le mélèze

Pour ce qui concerne le mélèze, une expérimentation STIR a été mise en place dans les Alpes du Nord, et deux dans les Alpes du Sud. Dans les Alpes du Nord (essai 91-19-07, Maurienne) le travail du sol a favorisé la régénération d'épicéa et de sapin mais pas de mélèze ; on en conclut que les travaux doivent concorder avec une année de bonne grainée, ce qui est peu fréquent pour cette essence. Les expérimentations 92-21-02 (Haute Tinée) et 87-21-08 (Barcelonnette) menées dans les Alpes du Sud mettent en lumière la nécessité d'un bon diagnostic stationnel préalable, afin de ne pas engager de travaux inutiles : dans certains contextes stationnels, le travail du sol n'est pas nécessaire.

Par ailleurs, l'étude de 72 sites décapés pour la régénération du mélèze dans les Alpes du Sud (Haute-Ubaye, Queyras et Briançonnais) (Ladier, 2003) montre à quel point le travail du sol y est répandu et admis en situation de régénération difficile. En termes de résultats, l'auteur a conclu à un effet bénéfique du décapage sur l'installation et la croissance initiale des semis, quelques années après travaux : 180 000 semis/ha ont été comptés en moyenne sur sol décapé, contre seulement 400 sur sol témoin.

Mais pour le sapin, des résultats plus mitigés

La régénération du sapin semble avoir préoccupé les forestiers de toutes les montagnes françaises, puisque huit expérimentations de travail du sol en sa faveur ont été mises en place, quatre dans les Vosges, deux dans les Alpes du Nord et deux dans les Pyrénées ; sans parler de celles des Montagnes d'Auvergne (non mentionnées ici). Ces essais, menés dans des massifs et des peuplements variés, ont montré de bons résultats lorsqu'ils étaient réalisés sous couvert (par exemple, essai 93-15-01 en forêt communale de Saint Amarin et Stosswhir : 170 000 semis/ha sur sol décapé contre 8 000 semis/ha sur sol témoin, 4 ans après travaux). À l'inverse, l'essai d'installation de micro banquettes dans une trouée de 0,7 ha en Chartreuse est un échec total. La végétation concurrente ainsi que l'épicéa ont été plus favorisés que le sapin.

Si une trouée est déjà ouverte dans le peuplement, il ne semble donc pas judicieux d'y travailler le sol en faveur du sapin. Attention néanmoins à la validité des résultats, les observations ayant été faites dans la plupart des cas dans les 3-4 premières années après travail du sol, ce qui est une durée courte pour conclure à la bonne installation des semis.

Globalement, le travail du sol accélère la fermeture des trouées...

M. Fuhr a observé la vitesse de fermeture de 36 trouées naturelles et sylvicoles âgées de 20 à 30 ans, (dont 10 crochetées) dans 14 forêts des Alpes du Nord (Fuhr et al., 2015).

Les résultats de l'étude montrent que la fermeture des trouées (couvert dépassant 80 % de la surface, toutes essences confondues) est accélérée par le travail du sol : celles-ci se referment 2,5 fois plus vite que le témoin au subalpin, 1,5 fois plus vite que le témoin au montagnard. Pour les trouées plantées, aucune tendance claire n'a pu être dégagée sur la vitesse de fermeture.

... mais les seuils de diagnostic sont difficiles à définir

Malgré ces résultats, les forestiers manquent de connaissances plus précises concernant la dynamique de la régénération à ces stades d'installation et de croissance initiale. Le diagnostic de la régénération suffisante ou non est souvent tiré du jugement individuel de chaque observateur et de comparaisons à des situations connues. Les gestionnaires souhaiteraient donc fixer des « seuils » objectifs, en deçà desquels il est établi que la régénération est insuffisante ; Mais les seuils à partir desquels on considère qu'une régénération est « viable », « acquise », ou « suffisante » dépendent de nombreux paramètres comme le peuplement, la station ou l'essence considérée, et n'ont à ce jour pas été déterminés (Couty et Gauquelin, 2006) (M. Fuhr, communication personnelle).

Néanmoins, une bonne partie des essais menés en France sur le sapin convergent pour dire qu'un seul semis de moins de 50 cm de haut par m² (soit moins de 10 000 semis/ha) est insuffisant. Les maigres données à dire d'expert dénichées pour le mélèze et l'épicéa semblent confirmer cette valeur. Pour une hauteur supérieure à 50 cm, les valeurs du GSM font office de référence : la régénération est considérée comme acquise lorsqu'il y a **au moins une cellule de régénération tous les 8 m soit 156 cellules/ha**, représentant en général 6 à 9 % de la surface. En forêt de protection, le GSM des Alpes du Sud remonte ce seuil à 800 semis viables/ha (un tous les 4 m).

En Suisse, ces valeurs seuils sont estimées à :

- 0,7 semis de moins de 10 cm de haut/m² soit 7 000 semis/ha (Streit *et al.*, 2009).
- 0,4 semis de 10 à 130 cm de haut/m² au haut montagnard soit 4 000 semis/ha (Bühler, 2005) et 0,18 semis/m² au subalpin soit 1 800 semis/ha (Ott *et al.*, 1997).

Et en pratique aujourd'hui ?

Les résultats des expérimentations passées montrent le grand intérêt du travail du sol pour l'obtention de la régénération d'épicéa et de mélèze. Mais en pratique, quelle utilisation fait-on aujourd'hui de cette technique dans les itinéraires sylvicoles de renouvellement des pessières et des mélézins ?

Dans les applications informatiques de programmation des travaux de l'ONF, le travail du sol ne bénéficie pas d'une appellation claire et explicite décrivant le type de travail réalisé. L'intitulé très générique « Travaux préalables à la régénération : préparation du sol » ne permet pas d'apprécier l'étendue des différentes pratiques. Mais les retours, même partiels, laissent penser que les gestionnaires de terrain emploient rarement cette technique. Une enquête a donc été menée auprès des gestionnaires forestiers des 73 Unités Territoriales de montagne (Alpes du Nord et du Sud, Vosges, Pyrénées) afin de les interroger sur le recours au travail du sol dans leur secteur. En tout, 44 UT ont répondu, réparties sur tous les massifs montagneux.

Les résultats de l'enquête de terrain

62 % des enquêtés ont indiqué ne pas mettre en œuvre de travail du sol, notamment dans les Vosges. Cette pratique est également peu utilisée dans les Pyrénées, mais les gestionnaires forestiers locaux semblent vouloir la développer à l'avenir.

Dans les secteurs où un travail du sol est réalisé, les chantiers (Fig. 4) visent principalement à favoriser la régénération de l'épicéa (surtout dans les Alpes du Nord), du mélèze (dans les Alpes du Sud) et du sapin (en Ardèche). Quelques chantiers ont également été réalisés pour favoriser des pins ou des feuillus (Ardèche, Alpes du Sud, Pyrénées).

Les causes de blocage évoquées sont majoritairement la végétation concurrente et l'humus trop épais. La technique employée est principalement le décapage, le plus souvent au godet, à l'aide d'un engin adapté à la pente (Fig. 5).

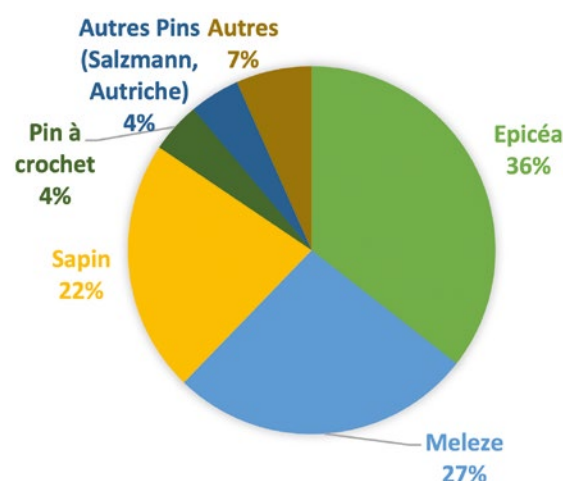


Figure 4. Essence-objectif principale des 39 chantiers de travail du sol renseignés (en % du nombre de chantiers).



Figure 5. Pelle-araignée équipée d'un godet décapant le sol, Esserts-Blay (73).

Bilan

Les expérimentations et observations réalisées montrent que **le travail du sol permet de lever de nombreuses situations de blocage** et de faciliter l'installation et la croissance initiale des semis, particulièrement à l'étage subalpin. **Le diagnostic préalable des causes de blocage est une étape clef**, permettant de cibler les situations dans lesquelles il est vraiment nécessaire d'engager des travaux.

Faute de pouvoir agir sur la fructification en elle-même, l'importance de faire coïncider le chantier de travail du sol avec une bonne fructification, ou à défaut, d'assurer un sol propre et réceptif pendant plusieurs années est soulignée à de nombreuses reprises.

Le retour d'enquête sur les pratiques actuelles laisse penser que les techniques de travail du sol sont peu connues en contexte de montagne, et rarement mises en œuvre. En outre, il est difficile de tirer

des conclusions quant à la réussite des chantiers d'après cette enquête, car la caractérisation de l'état de régénération des chantiers dépend fortement de l'appréciation de l'observateur. Enfin, la technique employée est rarement bien documentée (profondeur du travail du sol, nature des horizons décapés...) et souvent réduite à un seul mot, « crochetage » par exemple. Toute conclusion quant à la technique en elle-même est donc hasardeuse.

C'est pourquoi un inventaire détaillé de nombreux chantiers de travail du sol a été réalisé en 2018 dans les Alpes du Nord, avec pour objectif de caractériser objectivement et de manière uniforme l'état de régénération dans des contextes stationnels différents, et d'essayer de dégager des conclusions quant aux conditions optimales de réussite (contextes stationnels et technique employée).

Références

- Angst C., Brang P., Schönenberger W., 2001. Le reboisement après Lothar - Les chablis en montagne : Faut-il aider la régénération ou attendre ? La forêt vol. 54(1), pp. 20-24.
- Bastien Y. et Gauberville C. (coord.), 2011. Vocabulaire forestier. Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés. CNPF, ONF, AgroParisTech.
- Brang P., 1998. Early seeding establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. Canadian Journal of Forest Research, vol 28(4), pp. 626-639
- Bühler U., 2005. Jungwaldentwicklung als Eingangsgrösse in die Jagdplanung: Erfahrungen aus dem Kanton Graubünden. Birmensdorf : WSL. Forum für Wissen 2005, pp. 59-65
- Camaret S., 1997. Rôle des perturbations dans la dynamique des pessières d'altitude. Impact d'ouvertures artificielles et naturelles sur la régénération et le développement d'un peuplement forestier. Thèse de doctorat. Université Savoie Mont Blanc.
- Couty E., Gauquelin X., 2006. Etude d'indicateurs et de protocoles pour le suivi du renouvellement en futaie irrégulière de montagne. Rendez-vous techniques ONF n°12, pp. 59-63
- Duchauffour P., 1953. Régénération de l'Epicéa et pédologie. Revue Forestière Française vol. V(4), pp. 257-268
- Fourchy P., 1953. Travail du sol et régénération. Revue Forestière Française vol. V(5), pp. 328-340
- Fuhr M., Weyant J., Durand N., Riond C., 2015. Dynamique de fermeture des grandes trouées dans les forêts de montagne des Alpes du Nord. Rendez-vous techniques ONF n°47, pp. 3-10
- Garet E., 2017. Etat des lieux de l'utilisation du bois mort au sol. Mémoire de stage fin de 3^e année FIF-AgroParisTech. Nancy : AgroParisTech. Sion (Suisse) : Service des forêts, des cours d'eau et du paysage du Canton du Valais. 110 p.
- https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=193452
- Gaudio N., Balandier P., Dumas Y., Ginisty C., 2011. Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopoliste de sous-bois en milieu acide. Rendez-vous techniques ONF n°33-34, pp. 18-24
- Gauquelin X., Courbaud B. (coord.), 2006. Guide des Sylvicultures de Montagne Alpes du Nord françaises. Cemagref – CRPF Rhône-Alpes – ONF. 278 p.
- Gensac P., 1989. Régénération de l'épicéa sur les terrassements des pistes de ski. Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques n°136, pp. 327-334
- Ladier J., 2003. Régénération naturelle du mélèze d'Europe. La gestion compte plus que la station. Rendez-vous techniques ONF n°2, pp. 32-34
- Ott E., Frehner M., Frey H. U., Lüscher P., 1997. Gebirgsnadelwälder : Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Bern : Paul Haupt. 287 p.
- Pellissier F., 1992. Reboisement expérimental dans une pessière subalpine à régénération naturelle déficiente. Revue Forestière Française vol. XLIV(1), pp. 54-61
- Streit K., Wunder J., Brang P., 2009. Slit-shaped gaps are a successful silvicultural technique to promote *Picea abies* regeneration in mountain forests of the Swiss Alps. Forest ecology and management vol. 257(9), pp. 1902-1909
- Veuillen L., 2018. Travailler le sol en faveur de la régénération naturelle en montagne. Nancy: AgroParisTech. https://infodoc.agroparistech.fr/doc_num_data.php?explnum_id=6032

LE TRAVAIL DU SOL, ÇA MARCHE ! RETOURS D'EXPÉRIENCE ET MESURES SUR DES CHANTIERS RÉCENTS DES ALPES DU NORD

**Léa Veuillen⁽¹⁾, Laurent Malabeux⁽³⁾, Catherine Riond⁽³⁾,
Didier Cornevin⁽⁴⁾**

(1) Stage AgroParistech/ONF, pôle RATD Annecy

(2) INRAe Aix-Marseille – UMR RECOVER

(3) ONF – pôle RDI Chambéry

(4) ONF – Agence Savoie

Le travail du sol ayant montré son efficacité lors de nombreuses expérimentations installées par le passé, nous avons entrepris d'analyser les chantiers réalisés en gestion ces dernières années dans les Alpes du Nord avec deux objectifs principaux :

- d'une part, analyser un nombre important de chantiers afin de couvrir un large spectre de conditions stationnelles,
- d'autre part, mettre en place un réseau de chantiers référencés permettant la démonstration et la diffusion de cette technique au plus près des praticiens.

Ce sont ainsi une cinquantaine de trouées sylvicoles dans lesquelles le sol a été partiellement travaillé qui ont été décrites et caractérisées, afin d'évaluer les effets sur la régénération des essences objectifs.

Description des chantiers analysés

La campagne de relevés de terrain a été réalisée en 2018, sur 49 trouées sylvicoles dans les Alpes du Nord (Fig. 1), correspondant à 35 chantiers de travail du sol réalisés de 2002 à 2015 (un chantier peut concerner plusieurs trouées).

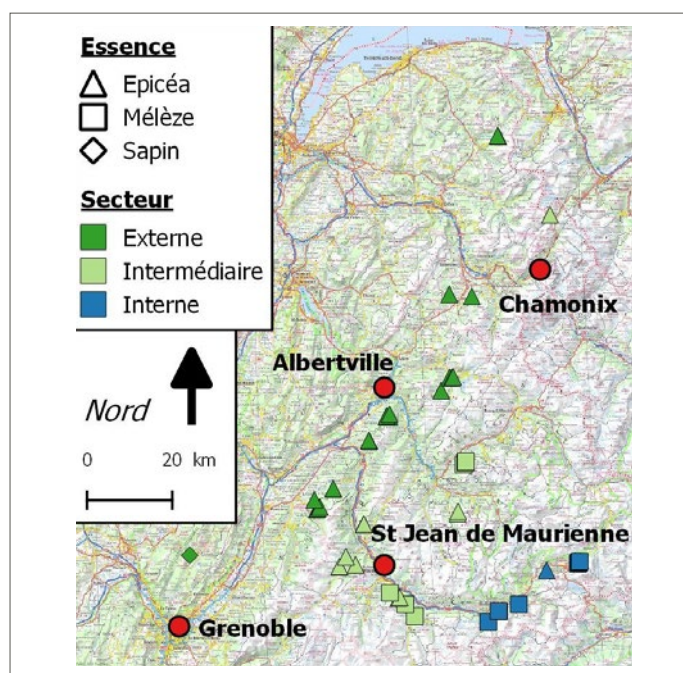


Figure 1. Localisation des chantiers analysés.

Caractérisation biogéographique des trouées sylvicoles étudiées

L'essence-objectif recherchée est majoritairement l'épicéa ; dans les Alpes internes ou intermédiaires, il peut également s'agir du mélèze. Une seule forêt, située en Chartreuse, a pour essence-objectif le Sapin.

Les forêts concernées se situent sur un gradient altitudinal allant de 1 130 à 2 030 m. Les températures minimales au mois de janvier peuvent descendre à -9,2°C dans les Alpes internes (Lanslevillard, 2 000 m d'altitude), -2°C dans les Alpes externes (Saint Pierre de Chartreuse, 1 200 m d'altitude). Le nombre de jours de gel par an varie de 95 à 195 selon le secteur climatique. Les précipitations sont très variables en fonction du secteur, de l'altitude, et de la topographie. Le secteur interne est ainsi moins arrosé que le secteur externe : 625 mm par an en moyenne contre 1 950 mm.

Les peuplements dans lesquels ont été ouvertes ces trouées sont pour la majorité de la famille des futaies riches en gros bois, avec une prépondérance des peuplements régularisés à gros bois (type 1GB, typologie des peuplements des Alpes du Nord, Guide des Sylvicultures de Montagne) (Fig. 2). Sous ces peuplements, la lumière parvenant au sol est extrêmement faible : 1 heure par jour en moyenne. On trouve aussi des peuplements de la famille des futaies à 2 étages et des futaies adultes, et en moindre mesure des jeunes futaies, futaies claires ou jardinées.

La taille des trouées est comprise entre 0,04 ha et 1,6 ha (médiane : 0,2 ha) avec une exception (trouée de chablis) de 5,5 ha. Deux tiers des trouées sont orientés en ubac.

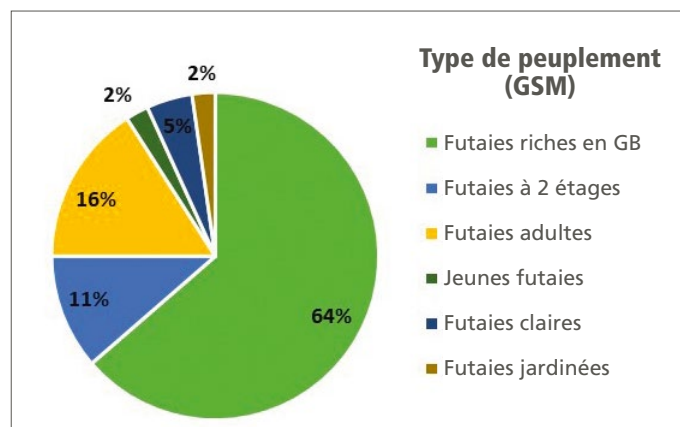


Figure 2. Types de peuplements dans lesquels ont été réalisés les travaux.

Une technique principale dans les Alpes du Nord : le décapage

Les chantiers étudiés ont été réalisés de 2002 à 2015, soit 3 à 16 ans avant notre inventaire, avec une répartition non uniforme : lors des relevés terrain, la grande majorité des chantiers (42) a moins de 9 ans, aucun chantier n'a entre 9 et 12 ans, et 7 chantiers ont entre 13 et 16 ans.

Le travail du sol consiste de manière quasi-systématique en un décapage (seules deux trouées ont été travaillées par broyage, l'affleurement d'imposants blocs rocheux rendant impossible le décapage). La profondeur de sol décapée est très hétérogène au sein d'un même chantier, et peut varier en fonction de l'état du terrain, de l'opérateur, de la profondeur des racines de la végétation concurrente... Cela rend sa mesure impossible. Nous estimons qu'elle est comprise entre 10 et 30 cm environ.

Le sol peut être décapé de plusieurs manières. Le décapage concerne une part variable de la surface de la trouée : il peut être réalisé en placeaux de taille variable, en bandes ou en plein, c'est-à-dire sur la totalité de la surface. La technique varie en fonction de l'opérateur, mais également du maître d'œuvre et des consignes données. Dans la grande majorité des cas (80 % des chantiers), on a utilisé une pelle araignée (de 2,5 à 12 tonnes). Il peut aussi s'agir d'une pelle à chenilles lorsque la pente n'est pas trop forte. Souvent, le choix de l'engin n'est pas conditionné par la topographie de la zone à régénérer, mais par les machines disponibles localement. Le godet est l'outil systématiquement employé pour le décapage.

Protocole et traitement des données

La régénération a été observée sur des placettes carrées de 1 m² disposées par couples, chaque couple étant constitué d'un groupe de 5 placettes sur sol travaillé et d'un groupe de 5 placettes témoin, dans une zone proche où le sol n'a pas été travaillé (Fig. 3).

Pour chaque trouée ont été inventoriées 15 placettes sur sol travaillé et autant de placettes témoin (trois couples de 5 placettes) ainsi qu'un groupe supplémentaire de 5 placettes témoin installé à proximité sous le couvert du peuplement. Cela représente un total de presque 1 500 placettes réparties dans 26 forêts. Sur chaque placette, nous avons compté le nombre de semis de chaque essence par classe de hauteur : semis de l'année ; 0-5 cm ; 5-10 cm ; 10-30 cm ; 30-50 cm ; plus de 50 cm. Nous avons également évalué le recouvrement de la végétation concurrente. Les caractéristiques stationnelles (pente, exposition, altitude, ensoleillement, caractéristiques édaphiques...) ont été relevées à l'échelle du groupe de 5 placettes. Le peuplement forestier dans lequel ont été ouvertes les trouées a fait l'objet d'une description : station et type de peuplement selon les typologies du GSM (Guide des sylvicultures de montagne), composition en essences, surface terrière.

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel libre *R* par l'utilisation des méthodes statistiques du test de Wilcoxon, du modèle linéaire généralisé et de *Random Forest*.

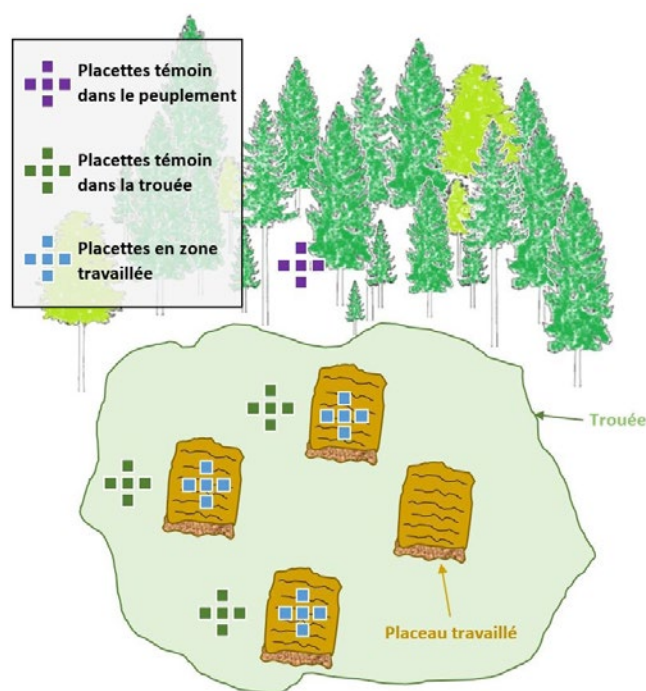


Figure 3. Schéma d'implantation des placettes de mesure (1 m² chacune) dans une trouée.



Installation d'une placette de mesure d'1 m de côté dans une trouée à Arvillard, 73.

© Léa Veuille

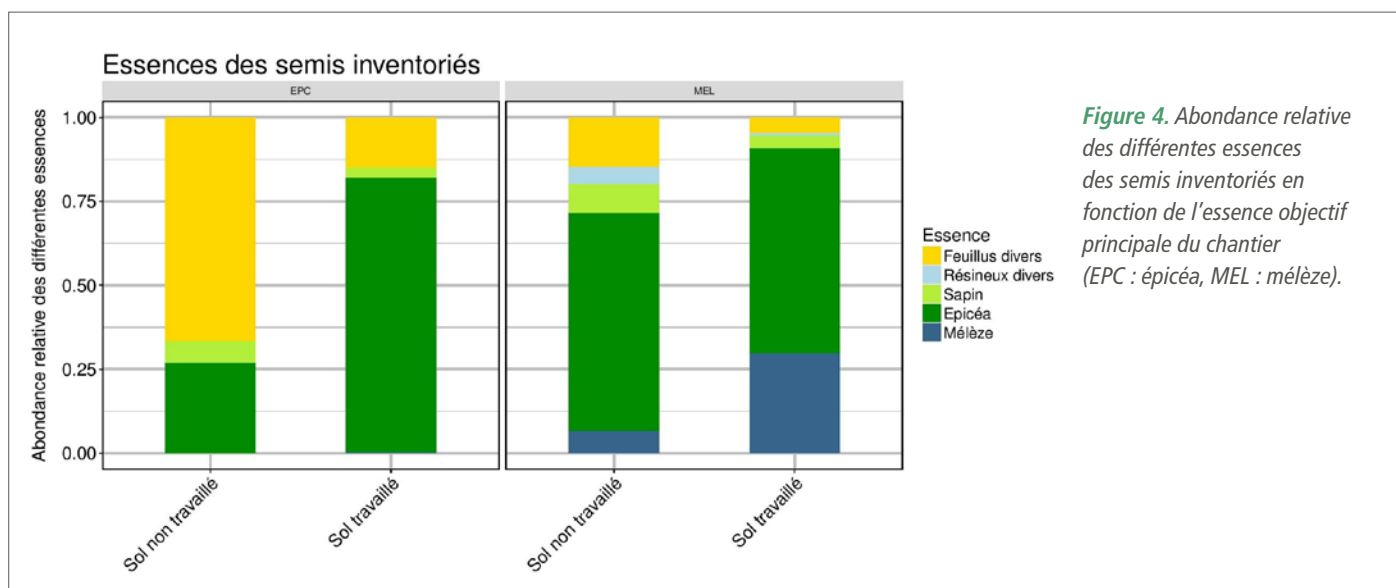
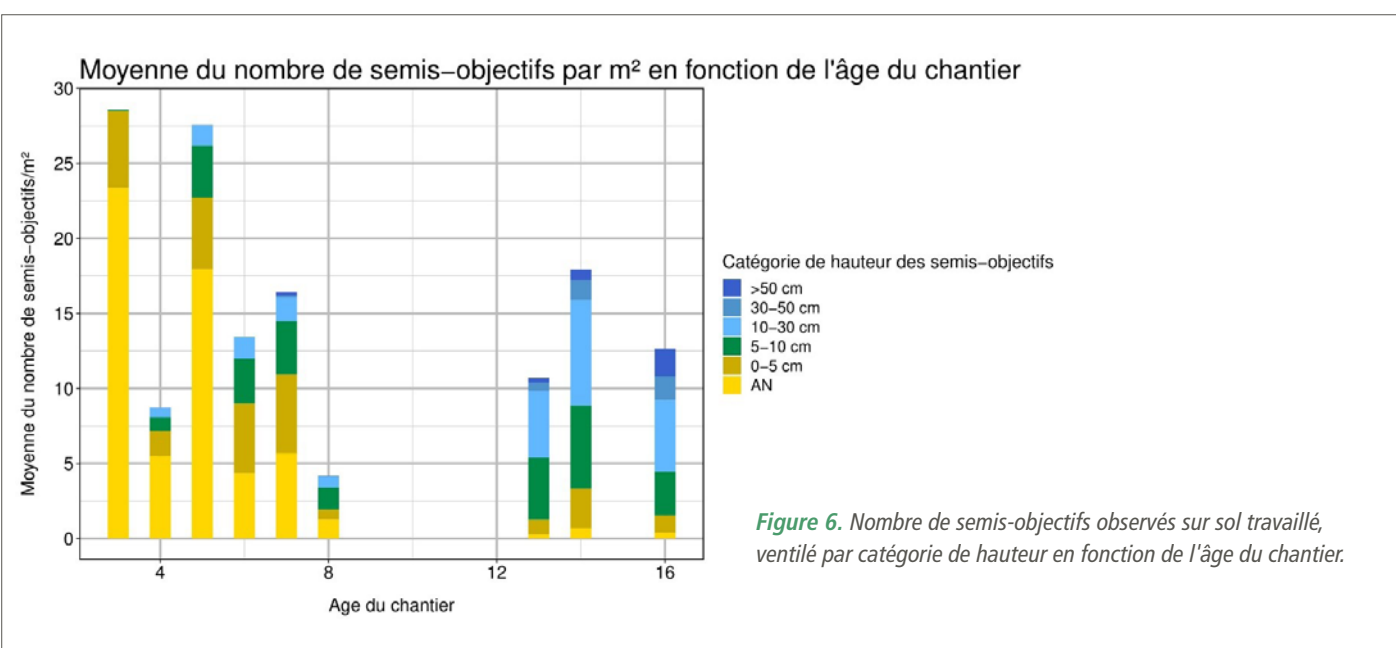


Figure 5. Régénération abondante d'épicéa sur sol décapé 6 ans auparavant. Beaufort (73).



De la régénération naturelle d'épicéa et... d'edelweiss sur sol travaillé, Aussois, (73).



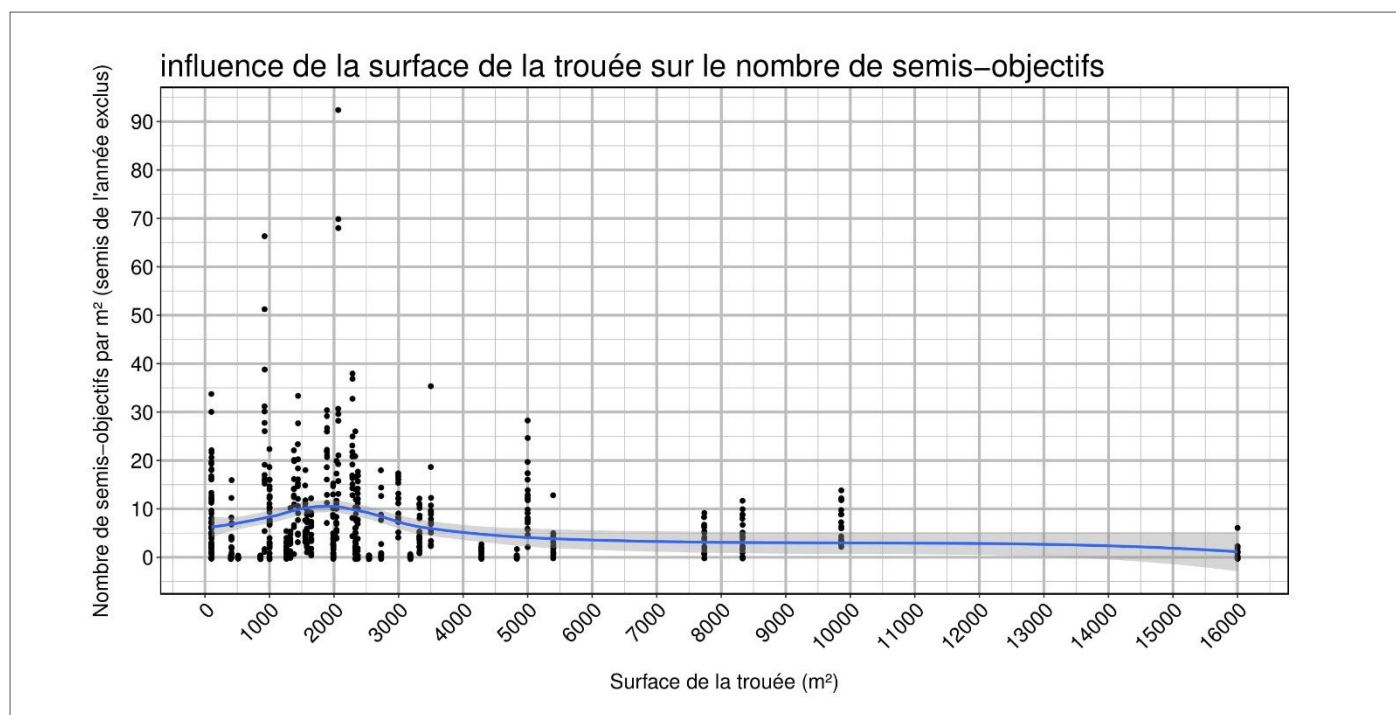


Figure 7. Nombre de semis-objectifs de plus d'un an observés sur sol travaillé en fonction de la surface de la trouée. Chaque point représente 1 m² échantillonné. En bleu : moyenne du nombre de semis-objectifs par m². Buffer gris : zone dans laquelle se situe la moyenne à un intervalle de confiance de 95 %.

Résultats

Le travail du sol favorise la régénération naturelle

Dans les trouées, il existe une différence significative de nombres de semis entre les placettes travaillées et les placettes témoin : il y a **toujours plus de semis des essences objectifs sur sol travaillé que sur sol non travaillé**. Le nombre de semis-objectifs par m² travaillé est très variable : sur l'ensemble des chantiers il varie de 0 à 162 semis/m², avec une moyenne de 17,1 semis objectifs/m² (soit 171 000 semis/ha) contre 0,41 pour les placettes témoin sur sol non travaillé. En termes de composition, c'est surtout l'essence-objectif principale qui bénéficie des effets du travail du sol (Fig. 4 et 5).

À noter aussi que sous le peuplement non ouvert, aucun semis-objectif n'a été observé pour 80 % des placettes et que sur les placettes restantes, la moitié des semis observés a poussé sur bois mort.

Ceci dit, la densité de semis-objectif sur sol travaillé est influencée par plusieurs paramètres au premier rang desquels (parmi les variables connues et mesurées) le nombre d'années depuis que le chantier a été réalisé. **Moins de la moitié des semis survivent dans les premières années qui suivent les travaux**. Plus le chantier est ancien, moins il y a de semis de l'année et plus les semis observés sont grands (Fig. 6). La mortalité des semis les 5 premières années est estimée à plus de 50 % dans la littérature (Streit *et al.*, 2009). Compte-tenu des aléas de fructification, il est donc important de faire coïncider l'année du chantier

avec une année de bonne fructification afin de maximiser les chances de réussite de la régénération.

Les autres variables qui ont le plus d'influence sur la densité de semis sur sol travaillé sont la surface de la trouée, l'exposition et la pente.

Ouvrir des trouées de taille adaptée

Le maximum de densité de régénération observé se situe dans les trouées de taille préconisée par le GSM, soit de 500 à 2 500 m².

Au-delà de 2 000 m², la surface de la trouée a une influence négative sur la densité de semis observée (Fig. 7). Ce résultat n'était pas relevé par une étude suisse publiée en 2009 traitant de la même problématique, qui concluait que la densité de régénération ne dépendait pas de la taille mais surtout de l'orientation de la trouée (Streit *et al.*, 2009). Cela vient sans doute de ce que la gamme des tailles de trouées étudiées était bien plus réduite (3 170 m² maximum) que celle que nous avons explorée.

Si la trouée est trop grande, l'ambiance forestière disparaît et les graines ont plus de distance à parcourir pour se disséminer. Peu de semis ont été comptabilisés dans les trouées de surface importante et des semis d'écépica jaunés ou brûlés par la lumière ont souvent été observés. D'après le graphique de la figure 7, il semble également qu'une trouée trop petite impacte négativement le nombre de semis au m² ; mais ce résultat n'est pas statistiquement significatif.

Effet positif de l'exposition en ubac, effet négatif des fortes pentes

La radiation, qui correspond à une quantité d'énergie reçue rapportée à une surface, a un effet négatif sur le nombre de semis-objectifs quelle que soit la classe considérée. Il y a donc plus de semis dans les zones travaillées en ubac qu'en adret (Fig. 8).

Les 3 trouées exposées nord-est présentent cependant un nombre de semis-objectifs au m² plus faible que les autres trouées d'ubac (6,5 semis/m² en médiane). Cela s'explique sûrement par le croisement de deux paramètres, exposition et âge du chantier : en effet pour l'exposition nord-est, nous ne disposons que de trouées dont les chantiers sont assez anciens (6-7 ans). Or comme vu plus haut, plus le chantier est ancien, moins la densité de semis est élevée puisque beaucoup de semis disparaissent les premières années après travaux.

D'après une étude italienne, la production de graines est meilleure en ubac qu'en adret (Mencuccini *et al.*, 1995) ce qui peut expliquer une partie de ces résultats. Mais les sources divergent quant à savoir si la croissance des semis est meilleure en adret ou en ubac (Ladier, 2003 ; Durand, 2012 ; Fourchy, 1961 ; Streit *et al.*, 2009).

Indépendamment de l'exposition, une pente forte nuit à l'installation des semis. La densité de semis est beaucoup plus faible lorsque la pente est forte (moyenne : 19 semis/m² sur pente de 0 à 50 % ; 4 semis/m² sur pente de 55 à 70 %). En effet, les graines ne parviennent pas à se stabiliser sur de fortes pentes, chaque précipitation importante pouvant les entraîner vers l'aval ; et localement, la radiation est augmentée (la même quantité de lumière impacte une surface plus petite), ce qui peut brûler les jeunes semis.

Le travail du sol pour favoriser le mélèze par rapport à l'épicéa

Une partie des trouées inventoriées a été ouverte dans des peuplements mélangés mélèze/épicéa, avec pour objectif prioritaire la régénération du mélèze, essence adaptée aux stations locales et présentant un intérêt économique (notamment les stations 4.4-Cembraies drainées à mélèze et 4.6-Pessières peu humides du subalpin).

Dans ces trouées, le mélèze représente en moyenne 33 % des semis-objectifs sur sol travaillé contre 2 % sur sol non travaillé (Fig. 4). Le travail du sol permet donc de favoriser le mélèze par rapport à l'épicéa, mais peut-être pas autant que souhaité puisque l'épicéa reste toujours l'essence majoritaire en nombre de semis. Cependant, cela s'explique aussi par la proportion de mélèzes dans le peuplement entourant la trouée, corrélée positivement à la proportion de mélèzes dans la régénération observée. Le forestier qui cherche à obtenir plus de mélèze en régénération naturelle doit donc prendre soin de réduire la proportion des autres résineux dans le peuplement adulte autour de la trouée, puis si besoin de réaliser des travaux de nettoyage de la régénération en faveur du mélèze.

Influence de l'exposition de la trouée sur le nombre de semis-objectifs

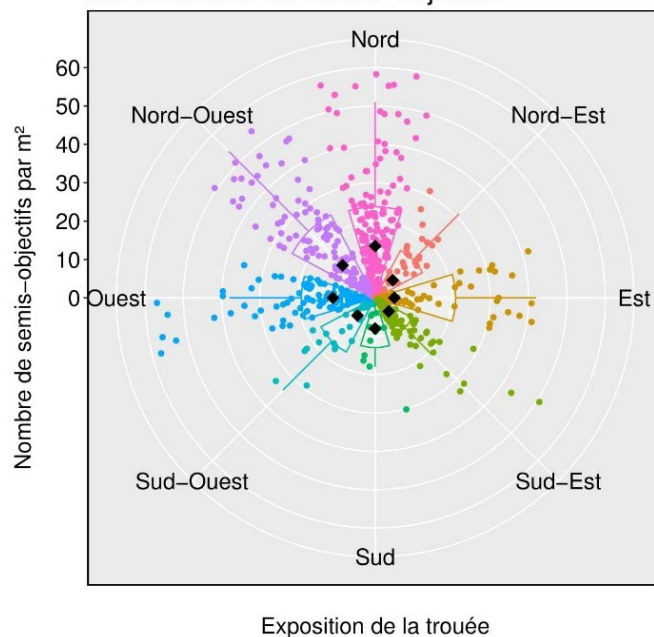


Figure 8. Influence de l'exposition sur la densité de semis-objectifs. En noir : médiane du nombre de semis-objectifs/m² pour chaque exposition. La taille du cône représente le 3^e quartile (représentation par boîtes à moustache).



Le résultat recherché : une régénération naturelle abondante une trentaine d'années après travail du sol, Beaufort, 73.

En conclusion, quel domaine d'application ?

Travailler le sol afin de favoriser la régénération naturelle constitue une action particulièrement efficace dans les cas de blocage édaphique ou par la végétation concurrente, lorsqu'on veut favoriser l'épicéa et/ou le mélèze au montagnard supérieur et au subalpin, dans des trouées ne dépassant pas 2 500 m². Si la pente est trop forte (supérieure à 70 %), le travail du sol est plus dangereux à réaliser, moins efficace, et n'est donc pas préconisé.

La décision de travailler le sol (ou non) doit donc obligatoirement être précédée par un diagnostic précis de la zone à régénérer. Au préalable, il est essentiel d'ouvrir des trouées de taille adaptée à la station et à la hauteur du peuplement (0,05 à 0,25 ha), suivant les recommandations du GSM.

La réussite d'un chantier de travail du sol est cependant conditionnée par la mise en œuvre d'une méthode adaptée au contexte de pentes. La confirmation du bénéfice du travail du sol sur l'acquisition de la régénération a donc naturellement conduit à s'interroger sur l'adaptation aux zones de montagne des engins, des outils et des modes opératoires classiquement utilisés en plaine. C'est l'objet de l'article suivant qui présente les étapes et les résultats du développement concerté d'un outil spécifique au travail du sol en pente.

En cas de blocage, attendre, travailler le sol ou planter ?

Cette question nécessite une analyse détaillée prenant en compte les enjeux du site mais également bien entendu les aspects économiques, ce qui n'a pas pu être réalisé dans le cadre du stage. Mais l'étude a néanmoins apporté un élément de comparaison en termes de temps d'acquisition de la régénération.

On fait l'hypothèse que le résultat d'une régénération sur sol travaillé est comparable à celui d'une plantation lorsque la trouée contient au moins 0,75 semis de plus de 10 cm de hauteur par m² (correspondant à une plantation en collectifs de jeunes plants de 10 à 20 cm de haut espacés de 0,5 à 2 m).

Sur les chantiers observés, il faut attendre 10 ans après travaux pour avoir plus de 80 % de chance d'observer ce résultat. Sans travail du sol, aucune des trouées n'a atteint cet objectif, même pour les chantiers les plus anciens.

Références

Durand N., 2012. Dynamique des trouées forestières dans les mélèzins des Alpes du Sud. Convention de recherche ONF-Irstea 2011-2016 ; rapport interne. Grenoble : Irstea. 38 p. + ann.

Fourchy P., (1961). Sapin et sapinières des Alpes : relativité en matière d'aménagement. Revue Forestière Française vol. XIII(4), pp. 233-243

Ladier J., 2003. Régénération naturelle du mélèze d'Europe. La gestion compte plus que la station. Rendez-vous techniques ONF n°2, pp. 32-34

Mencuccini M., Puissi P., Zansi Sulli A., (1995). Thirty years of seed production in a subalpine Norway spruce forest : Patterns of temporal and spatial variation. Forest Ecology and Management vol.76(1-3), pp. 109-125

Streit K., Wunder J., Brang P., 2009. Slit-shaped gaps are a successful silvicultural technique to promote Picea abies regeneration in mountain forests of the Swiss Alps. Forest ecology and management vol. 257(9), pp. 1902-1909

DE L'INNOVATION EN MONTAGNE : UNE MÉTHODE DE TRAVAIL DU SOL AVEC UN OUTIL ADAPTÉ

Laurent Malabeux, Catherine Riond

ONF – pôle RDI Chambéry

Didier Cornevin

ONF – Agence Savoie

Le travail du sol est efficace pour l'obtention de la régénération naturelle. Mais comment optimiser son coût dans les conditions difficiles de montagne ?

La pente, l'encombrement des rémanents, la pierrosité et l'irrégularité du sol sont autant de difficultés à surmonter. La principale méthode mise en œuvre jusqu'à présent était d'employer une pelle araignée équipée d'un godet de 80 cm de large permettant de décaper le sol en surface. Mais la faible largeur de ce godet classique ne permet pas un bon rendement et surtout ce type d'outil n'est pas idéal pour brasser des rémanents. De plus, il est vite apparu que l'organisation du chantier est un facteur important d'efficacité, en contrôlant notamment le pourcentage de surface travaillée et le déplacement de l'engin.

Sous l'impulsion du pôle RDI (Recherche, Développement et Innovation) de Chambéry et des chargés de sylviculture de la Direction Territoriale Auvergne-Rhône-Alpes, un groupe de travail s'est constitué début 2018 pour étudier :

- la mise au point d'un outil efficace,
- la définition d'une méthode et d'une organisation de chantier permettant d'optimiser les différentes phases de travail. L'objectif à terme est de créer une prestation standard référencée pour la programmation de tels travaux.

Le groupe a réuni des membres d'INRAe Nancy et INRAe Grenoble et, côté ONF, du pôle RDI et des différents services de gestion ainsi que de l'agence travaux Auvergne-Rhône-Alpes. Nous décrivons ici la démarche qui, en moins de deux ans, a abouti à la conception et l'adoption d'un nouvel outil et d'une méthode de travail qui répondent aux préoccupations des gestionnaires.

Remerciements

Ces travaux n'auraient pas abouti sans l'aide de personnes et équipes auxquelles nous adressons de chaleureux remerciements :

- l'ensemble des personnels de l'Unité territoriale ONF Haute-Maurienne pour la recherche et la mise à disposition de chantiers pilotes,
- Les équipes Isère et Savoie de l'Agence travaux ONF Auvergne-Rhône-Alpes pour leur réactivité et mise à disposition de matériel,
- L'entreprise Grenier Franco pour sa forte implication dans la démarche

Cahier des charges et mise au point de l'outil

En mai 2018, le spécialiste mécanisation de la RDI-ONF a établi un cahier des charges pour la conception d'un outil adapté à une pelle araignée de 7 ou 8 tonnes, travaillant en forte pente, entre 40 % et 70 % :

- **Aide au déplacement** : la pelle doit pouvoir s'appuyer sur l'outil pour avancer (besoin spécifique aux pelles-araignée).
- **Préhension de billons** : l'outil doit pouvoir enlever sans problème des billons (principalement des purges) et les positionner de manière à ce qu'ils soient bien stabilisés.
- **Arrachage des ligneux** : il s'agit de supprimer la végétation aérienne qui gêne le passage de l'engin (surtout noisetier et saule, en cépée ; diamètre des tiges à la base 2 à 10 cm), afin de ne pas avoir à mobiliser un opérateur pour le faire au préalable (ce qui est coûteux).
- **Déplacer et stabiliser des pierres** : ce doit être une utilisation exceptionnelle, si l'opérateur n'a pas le choix car il vaut mieux laisser les pierres là où elles sont.
- **Réalisation de micro-banquettes** : il faut pouvoir travailler perpendiculairement à la pente.
- **Mise en andains des rémanents** : avant de travailler le sol, l'outil doit pouvoir enlever les rémanents divers (branchages surtout) et les placer de manière à ce qu'ils jouent un rôle protecteur contre l'érosion du sol (sur les côtés et en bas de pente du plateau).
- **Décapage** : l'outil doit pouvoir éliminer la végétation concurrente (herbacées, éricacées, mousses) et l'humus épais contenant la banque de graines de cette végétation.
- **Travail léger du sol (légère scarification)** : il s'agit de « faire le sanglier », c'est-à-dire de façonner un sol rugueux (piochage), sur une profondeur d'environ 10 cm, afin que les graines puissent se stabiliser dans les creux.

L'entreprise Grenier-Franco, fabriquant d'outils agricoles et forestiers situé dans la Drôme, a été mandatée pour élaborer un tel outil en s'inspirant du Scarificateur réversible® Becker, renforcé et adapté sur une pelle-araignée. Après des premiers essais en juin 2018 et quelques modifications, l'outil, dénommé Scarificateur « Montagne », était disponible à l'automne 2018 pour des essais chronométrés grandeur nature.

Suivi et mesure de rendements sur des chantiers pilotes

L'objectif de ces chantiers pilotes était de comparer l'efficacité du travail et les rendements du Scarificateur « Montagne » face à un godet classique monté sur une pelle-araignée de 7,5 tonnes Camuc 6500. Ce porte-outil, fréquent en montagne, était mis à disposition avec son chauffeur par l'Unité de Production Isère de l'Agence travaux ONF Auvergne-Rhône-Alpes. Avant la mise en œuvre des chronométrages et suivis de chantiers, un temps de prise en main du nouvel outil par le chauffeur de la pelle-araignée a été nécessaire. Cette découverte de l'outil a été l'occasion d'échanges importants avec le chauffeur pour dégager une méthodologie d'intervention adaptée au contexte local. Cette méthodologie, détaillée sur la fiche technique annexée au présent article, a été appliquée sur trois chantiers situés dans la vallée de la Maurienne (73) :

- forêt communale de Valloire : 5 trouées soit une surface cumulée de 1,5 ha parcourus
- forêt communale de Saint Martin d'Arc (Fig. 1) : 3 trouées pour 0,47 ha parcourus
- forêt communale de Montricher-Albanne : 2 trouées pour 0,56 ha parcourus.

Un protocole de suivi rigoureux

La méthodologie retenue, conforme à la préconisation du Guide des Sylvicultures de Montagne - Alpes du Nord, consiste à ne travailler qu'une partie du sol (20-25 % de la surface) au sein de trouées forestières, sur des placeaux de 50-60 m², suffisamment grands pour acquérir une régénération naturelle par collectif (2-3 collectifs espérés par placeau). Pour faciliter le suivi et veiller au respect des consignes initiales sur

chaque chantier, les placeaux de travail du sol ont été préalablement positionnés à l'aide de jalons dans les trouées. L'opérateur avait pour consigne de réaliser dans un même chantier des placeaux avec les deux outils : la moitié des trouées avec le godet et les autres trouées avec le Scarificateur « Montagne ».

Chaque trouée et chaque placeau ont fait l'objet d'une description précise (surface, pente, position GPS). Les différentes phases de travail ont été chronométrées sur l'ensemble des chantiers :

- déplacements entre deux placeaux,
- travail sur chaque placeau en distinguant la mise de côté des rémanents, le décapage, le piochage, le déplacement sur le placeau,
- tâches diverses : entretiens, pauses, etc.



Figure 1. Évolution de la pelle-araignée dans une pente à 65 % et levé GPS (Trimble XT) du centre d'un placeau travaillé à l'aide du scarificateur « Montagne » en forêt communale de Saint Martin d'Arc.

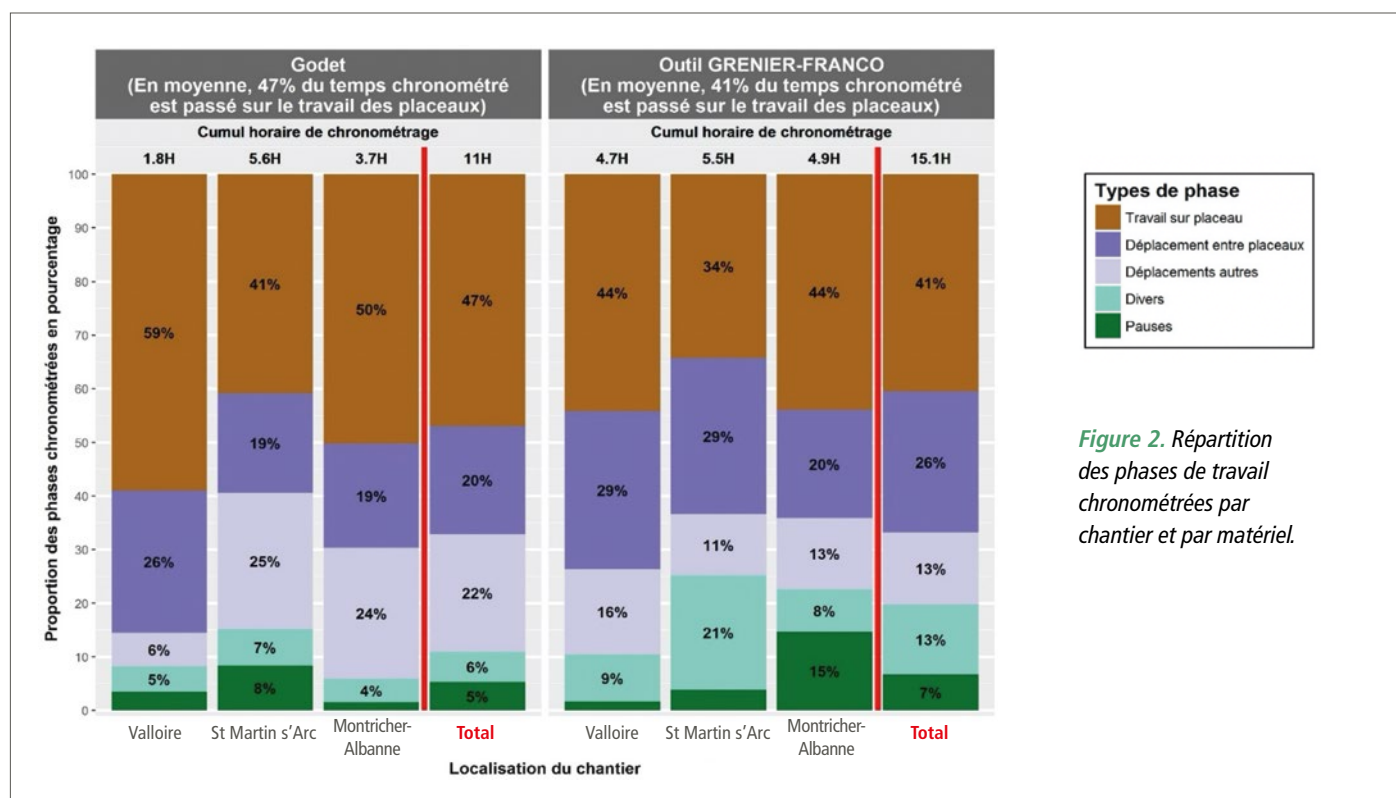


Figure 2. Répartition des phases de travail chronométrées par chantier et par matériel.

Des résultats convaincants

Les observations et chronométrages des chantiers se sont déroulés dans de bonnes conditions (pas de pannes mécaniques et météo favorable) et sur une durée suffisante pour analyser finement les données récoltées (plus de 26 heures cumulées sur les 3 chantiers avec 74 placeaux ayant fait l'objet d'un chronométrage). Les placeaux travaillés ont une surface de 50 à 60 m² et ils représentent au total 20 % de la surface de la trouée, en conformité avec les prescriptions. Visuellement, le rendu du travail est également conforme, avec la formation de micro-reliefs propices à la germination des graines.

L'analyse des résultats de chronométrage et les observations in situ ont mis en évidence les éléments suivants :

- La phase de travail prédominante est logiquement celle du travail sur les placeaux mais elle représente moins de 50 % de l'ensemble des phases chronométrées, que ce soit avec le godet ou le Scarificateur « Montagne ». En effet, la pelle-araignée dispose d'une capacité de franchissement exceptionnelle mais sa vitesse de déplacement est très lente (entre 150 et 400 m/H selon le sens de progression dans la pente), d'où la part importante des déplacements de la machine dans les chronométrages, que ce soit entre les placeaux ou entre les trouées (Fig. 2).
- Le Scarificateur « Montagne » est plus efficient que le godet classique dans la phase de travail sur un placeau grâce à une largeur de travail plus importante et une maniabilité de l'outil plus adaptée à ce travail, d'après le chauffeur. Les résultats chronométriques sont évidents sur ce point : le scarificateur « Montage » permet un gain de temps de 28 % sur un placeau standard de 50 m². En tenant compte des déplacements et autres phases observées sur les chantiers suivis, on arrive alors à une réduction de 16 % du temps passé par la machine pour parcourir 1 hectare de trouée (Fig. 3).

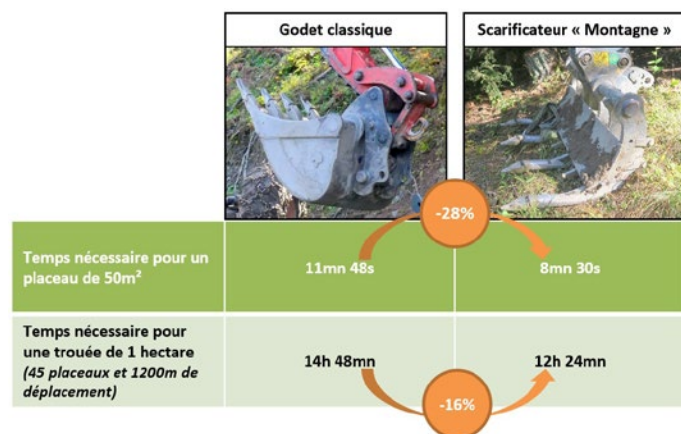


Figure 3. Comparaison des productivités des outils.

Conclusion et perspectives

Grâce à une très bonne collaboration entre les organismes de recherche (INRAe), les équipes RDI de l'ONF, les services de gestion et un constructeur de machines, la mise au point d'un outil de travail du sol adapté aux contextes de montagne a pu être réalisée en moins d'un an. La diffusion de cet outil s'accompagne d'une fiche technique, annexée à cet article, qui précise bien les conditions de réussite d'un chantier, à coût maîtrisé ; une vidéo de démonstration sera également bientôt disponible.

Car le choix de l'outil n'est pas le seul élément d'un bon rendement. Il faut aussi choisir l'engin porte-outil le plus pertinent, en fonction de la pente et de l'encombrement : si « passe-partout » soit-elle, une pelle araignée se déplace bien plus lentement qu'une pelle à chenille et ne se justifie qu'en terrain escarpé. La préparation du chantier (regroupement de sites, repérage, évaluation précise de la surface à parcourir, jalonnement) et la méthode de travail sont aussi des atouts importants pour un chantier réussi.

Enfin le rôle du chauffeur de pelle est prépondérant : la pelle araignée possède des capacités de travail prodigieuses dans les fortes pentes (jusqu'à 70 %)... si le chauffeur est formé, expérimenté et reconnu pour ses compétences techniques.

Quand toutes les conditions sont réunies, un chantier en forte pente à la pelle-araignée ne coûtera pas plus de 2 000 €/ha, voire beaucoup moins dans les situations qui ne cumulent pas les difficultés, et avec un chauffeur expérimenté.

Des questions en suspens

Le milieu montagnard est souvent considéré, à raison, comme un environnement naturel et esthétique. Un travail du sol peut choquer les usagers et une information est parfois nécessaire.

La question de l'impact de cette technique est aussi posée. D'une part au niveau du maintien de la fertilité des sols, et d'autre part d'un point de vue environnemental. On peut considérer que le travail en placeaux sur une part réduite de la surface ouverte (20 %) est de nature à limiter la perte locale de fertilité. On peut également constater, en termes de biodiversité, que la perturbation n'est pas permanente et qu'on observe souvent une évolution de la flore favorable à la diversité des espèces : là où ne poussait que de la myrtille ou de l'adénostyle, les placeaux travaillés sont recolonisés par de multiples espèces qui ne trouvaient plus leur place. Il est cependant déconseillé de travailler le sol dans des milieux trop humides, et bien entendu, dans des sites bénéficiant d'une réglementation spéciale de conservation : arrêté de protection de biotope, site Natura 2000, etc.

Création et renouvellement des forêts

OUTILS DE GESTION DE LA VÉGÉTATION CONCURRENTÉ ET DE PRÉPARATION DU SOL

Le SCARIFICATEUR « Montagne »

Décapage, travail du sol



Provoquer la régénération :

Dans les **pessières, mélézins et pineraies de montagne**, cet outil permet de :

- **maîtriser la végétation concurrente** (blocage de la germination).
- **travailler le sol** pour un bon développement racinaire du semis.

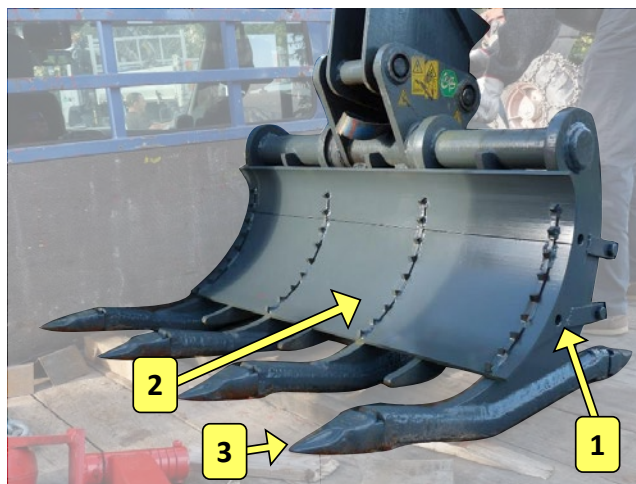
Optimisé pour les fortes pentes, cet outil est néanmoins utilisable en plaine !

Le **Scarificateur « Montagne »** s'utilise en **préparation de régénération naturelle ou de plantation en zone ouverte (trouée, coupe de régénération)**. Par décapage des 10-15 premiers centimètres du sol, cet outil élimine principalement la végétation concurrente et les horizons humifères bloquants. Ensuite, il permet de réaliser un travail du sol sur 30-40 cm de profondeur par piochage tout en réalisant des billons.

Caractéristiques techniques de l'outil

D'une largeur de 120 cm pour un poids d'environ 400 kg, le Scarificateur « Montagne » est composé de :

- 1** Quatre dents principales d'une hauteur de 50 cm accompagnées de trois dents secondaires
- 2** Une lame courbée (plaque amovible) munie de picots limitant le glissement des billons
- 3** Des obus fixés sur les 2 extrémités de chaque dent de sous-solage (110 cm de long)



Un outil adaptable sur pelle-araignée !

Les pelles-araignées utilisent fréquemment leur bras comme point d'appui lors des déplacements en forte pente. La conception et la solidité du Scarificateur « Montagne » lui permettent d'être utilisé sur des pelles-araignées allant jusqu'à 9 tonnes.

Le SCARIFICATEUR « Montagne »

Méthodologie de travail avec une pelle-araignée en contexte de futaie irrégulière

Phases de travail

Phase 1 PREPARATION du chantier

Délimiter et cartographier les zones à parcourir. Travail effectif sur **25-30% de ces zones par plateau unitaire de 50 m² minimum**. Prévoir **45 à 50 placeaux/ha**. Piqueter et cartographier le centre des placeaux à réaliser avec un **jalon visible de loin par le chauffeur** de la pelle-araignée. Eviter les zones trop denses en souches et gros blocs rocheux. Favoriser l'alignement vertical des jalons pour limiter les déplacements latéraux.

Phase 2 DEPLACEMENT vers la zone de travail

Accéder au **sommet de la zone à parcourir** sans réaliser de travail du sol pour optimiser la vitesse de déplacement de la pelle-araignée. Positionner la machine en **aval du jalon**.

Phase 3 TRAVAIL d'un plateau

Un plateau est réalisé en 2 à 3 passes. Pour chaque passe, 3 étapes sont nécessaires :

Phase 3a DEBLAIEMENT

Déblayer et **stabiliser les obstacles gênants** (rémanents, pierres, petites souches) par des mouvements latéraux ou contre la lame/les bras de la pelle-araignée. Prévoir une **signalétique appropriée** (+ arrêté de circulation) face aux **risques de mise en mouvement vers l'aval** !

Phase 3b DECAPAGE

Décaper la végétation concurrente et l'horizon humifère **sur les 10 à 15 premiers centimètres du sol**. Stocker les matériaux décapés vers le bas contre la lame/les bras de la pelle.

Phase 3c PIOCHAGE et BILLONNAGE

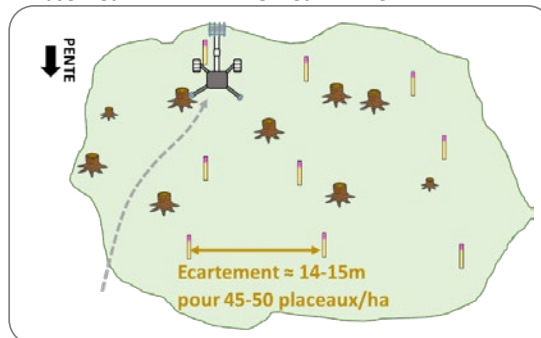
Créer des micro-reliefs favorables à la rétention de l'eau et des graines. Enfoncer verticalement les obus de sous-solage puis tirer vers l'aval pour **modeler un billon d'environ 30 à 40 cm de haut**.

*Lorsqu'une passe est terminée, la pelle descend en aval de quelques mètres et recommence les 3 étapes pour agrandir le plateau jusqu'à 50 m². La pelle-araignée reste toujours **positionnée en aval** du plateau travaillé.*

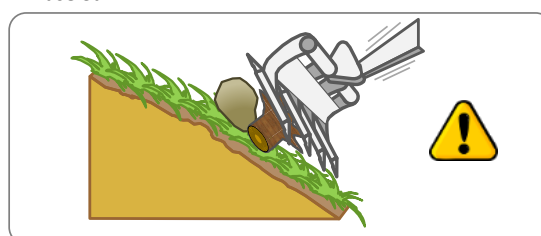
Phase 4 DEPLACEMENT entre placeaux

Descendre vers le prochain jalon. Renouveler le travail du sol. Arrivée en bas de la rangée de placeaux, la pelle-araignée remonte en diagonale vers la prochaine rangée à effectuer.

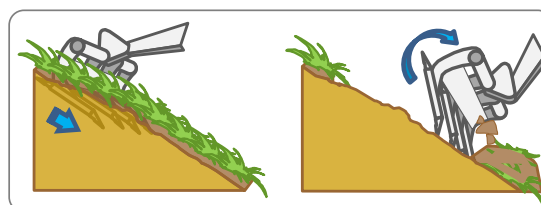
Phase 1 et 2 : PREPARATION et DEPLACEMENT



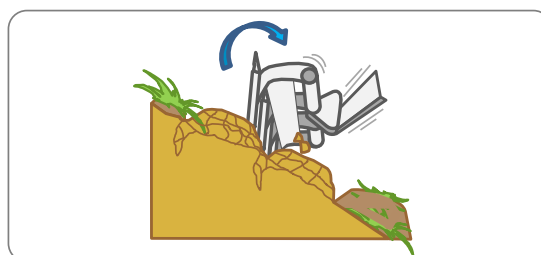
Phase 3a : DEBLAIEMENT



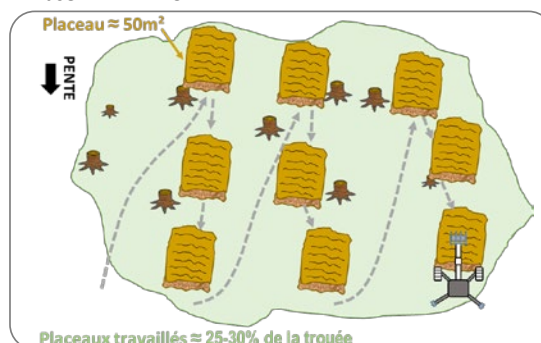
Phase 3b : DECAPAGE



Phase 3c : PIOCHAGE et BILLONNAGE



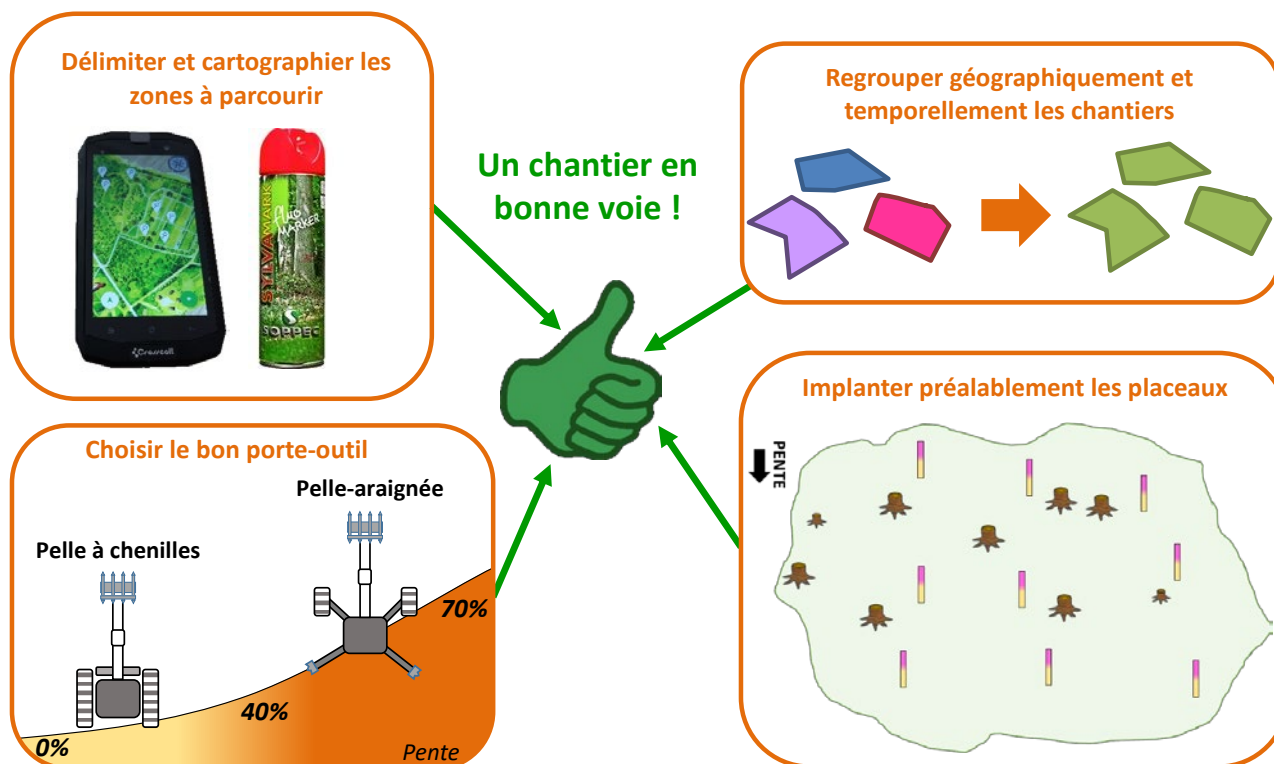
Phase 4 : DEPLACEMENT



Le SCARIFICATEUR « Montagne »

Performances techniques et économiques

Le choix de l'outil n'est pas le seul élément pour obtenir de bons rendements...



Vitesse de travail

► **Rendement d'une pelle araignée pour un contexte de 40% à 70% de pente avec peu de rémanents :**

- 12 heures pour 1ha de trouée parcouru soit 45-50 placeaux
- Gain de 30% de temps sur la réalisation des placeaux par rapport à un godet classique
- Les déplacements entre placeaux représentent 50% du temps de travail effectif.

Précaution de mise en œuvre

► **Préparation du chantier :**

- Planter les placeaux avant le début du chantier
- Ne pas broyer et couper les ligneux jusqu'à 15cm de diamètre (arrachage effectué par la pelle)
- Travailler en automne afin d'avoir un lit de germination prêt pour le printemps suivant

► **Pendant le chantier :**

- Sécuriser les abords et accès du chantier
- Positionner la pelle en aval du placeau pour mettre en forme correctement les billons
- Eviter au maximum le déplacement des obstacles gênants

► **En cas de plantation :**

Ce type de préparation de sol permet de faciliter la plantation et d'améliorer la mise en place du système racinaire.



Les micro-reliefs sont essentiels !

Creux et bosses freinent le ruissellement des graines et augmentent leur potentialité de germer sur un **micro-site** présentant la **bonne combinaison d'humidité et de chaleur** !

Le SCARIFICATEUR « Montagne »

A retenir

AVANTAGES

- Méthode efficace pour un désherbage mécanique
- Outil de travail du sol plus performant qu'un godet en terme de maniabilité et de rendement
- Contexte de fortes pentes → utilisable sur pelle-araignée
- En présence de rémanents → outil bien adapté au déblaiement et broyage inutile
- Décompactage du sol jusqu'à une profondeur de 40 cm par piochage → développement racinaire facilité (notamment en cas de plantation)
- Décapage et billonnage → création d'un lit de germination favorable à l'installation des graines (sol réceptif pendant 5 ans en moyenne)
- Réduction ou suppression des dégagements
- Modularité → transformable en scarificateur réversible en enlevant la plaque servant au décapage

LIMITES & CONTRAINTES

- Phase de décapage adaptée uniquement aux pessières, mélézins et pineraies de montagne (efficacité non évaluée dans les sapinières)
- Veille sur la concordance entre les bonnes années de grainées et la réalisation du travail du sol
- Inadéquation sur des sols très compacts et/ou à très forte charge en éléments grossiers
- Nécessité d'opérer sur sol ressuyé ou partiellement ressuyé
- Aspect visuel pouvant choquer pour un œil non averti la 1^{ère} année suivant le chantier
- Perturbation du sol temporaire et limitée en surface
- Diversification temporaire de la flore sur les plateaux travaillés par rapport aux zones non travaillées

Contacts utiles et renseignements

➔ MALABEUX Laurent – Pôle RDI de Chambéry Office National des Forêts

17, rue des diables bleus; CS 92628 -
73026 CHAMBERY Cedex
☎ 06.18.68.18.00 ou 04.79.69.96.27 –
laurent.malabeux@onf.fr

➔ Pôle renouvellement des peuplements forestiers (RENFOR)

INRAE Grand-Est Nancy, Silva UMR 1343, rue d'Amance –
54280 CHAMPENOIX - FRANCE
☎ 03.83.39.40.45 –
www6.inrae.fr/renfor



Où trouver l'outil ?

➔ **GRENIER FRANCO** - RN7 Creux de la Thine -
26140 ANDANCETTE- FRANCE - ☎ 04.75.03.12.43
✉ francodg@orange.fr

Des semis de l'essence objectif en nombre !

Les suivis de chantiers réalisés dans les Alpes du Nord montrent que les plateaux travaillés présentent en moyenne **dans les 5 ans suivant la fin du chantier une densité de semis 30 fois plus élevée** que sur le reste de la trouée.

Fiche technique « Scarificateur Montagne » - Mars 2020
Reproduction autorisée sous réserve de respect de l'intégrité du document.
Fiche téléchargeable sur le site : www6.inrae.fr/renfor/Ressources
Crédits photos : ©INRAE et ©ONF – Dessins : L.MALABEUX (ONF)

4

Rédaction :

L.MALABEUX - D.CORNEVIN

Groupe de travail :

E.ULRICH - C.RIOND - C.RICHTER – J.PITAUD
C.COLLET - JP.FRANCO

Financiers :

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation



RÉGÉNÉRATION NATURELLE SUR BOIS MORT : UNE ALTERNATIVE À LA PLANTATION ET AU TRAVAIL DU SOL

Didier Cornevin

ONF – Agence Savoie

Laurent Malabeux, Catherine Riond

ONF – pôle RDI Chambéry

Bien exécuté, avec un outil et une méthode appropriés, le travail du sol est un bon moyen de pallier les situations de blocage et réussir le renouvellement par trouées des forêts de montagne. Dans certains cas cependant, le travail du sol n'est pas possible mais la réussite du renouvellement n'en est pas moins essentielle. Pour ces situations, une autre méthode prometteuse est en test : la régénération sur bois mort.

En milieu montagnard, quand la régénération naturelle de résineux est bloquée en conditions humides ou par la végétation concurrente trop dynamique, les seuls semis visibles apparaissent sur les souches et les bois morts en voie de décomposition avancée. Ces microsites sont favorables à l'implantation de cellules de régénération qui finissent par s'étendre de proche en proche (Gensac 1990, Stöckly 1995, Bernier 2005). Cette propagation permet un renouvellement par collectifs, en forme de dôme, les semis centraux étant les plus vieux.

Alors que le travail du sol a montré son intérêt pour la régénération de l'épicéa ou du mélèze, les résultats sont plus mitigés pour le sapin, et ces opérations ne sont pas réalisables dans certains contextes tels que les fortes pentes ou encore les éboulis. La mise au point d'autres méthodes alternatives pour lever les blocages de régénération en contexte de montagne présente donc un intérêt pour les gestionnaires.

En s'appuyant sur une étude récente menée en Suisse (Garet, 2017), le Réseau d'Appui Technique et de Développement (RATD) de la Direction territoriale ONF Auvergne-Rhône-Alpes a souhaité réaliser des chantiers pilotes de mise en place de bois mort au sol, afin d'évaluer la faisabilité opérationnelle et économique de cette technique.

Une pratique venue de Suisse

Laisser un volume conséquent de bois mort en forêt est donc préconisé dans certaines situations pour créer autant de microsites favorables. La quantité de bois à laisser ne fait pas consensus ; en Suisse, dans le canton du Valais où la pratique est courante depuis 2008, il est préconisé d'abandonner 10 % du volume de la coupe sans précision sur le type de produits. En France, dans le Guide de Sylviculture de Montagne (Gauquelin et Courbaud, 2006), on raisonne plutôt en nombre de cellules de régénération, ce qui revient à raisonner en nombre de supports (voir plus loin).



Exemple de régénération sur souche : forêt communale d'Arvillard (73), parcelle 18 - 2018.

Le temps de décomposition du bois mort est fonction de différents facteurs : essence, diamètre et état de l'arbre qui tombe au sol, température, humidité et acidité du sol, etc. Le hêtre se décompose deux fois plus vite que l'épicéa, la demi-vie du processus de décomposition étant respectivement de l'ordre de 10 ans et 20 ans. Le mélèze se décompose trois fois plus lentement que l'épicéa : 60 ans pour la demi-décomposition. (Garet – 2017).

Quoi qu'il en soit, un bilan de cette pratique dans le Valais, réalisé en 2017 par Elie Garet, incite à considérer cette technique de près. Cette étude montre en effet que les semis commencent à apparaître après 8 ans de décomposition et que 14 ans sont suffisants en moyenne pour obtenir des semis viables sur bois mort. La colonisation des souches est plus rapide que celle des grumes, du fait de l'orientation des fibres : le bois semble pourrir plus vite et la prospection racinaire des semis est plus aisée avec des fibres orientées verticalement.

Ces observations ont mis en évidence un temps de renouvellement plus réduit que ce qui est habituellement constaté. En effet, même si les données ne sont pas complètement comparables, une étude d'Irstea (Fuhr *et al.*, 2015) avait montré qu'il faut 40 ans en stations contraignantes dans les Alpes pour obtenir la fermeture du couvert dans les trouées, que l'on peut assimiler à un stade de régénération acquise.

Pour obtenir une régénération suffisante, 100 à 150 supports par hectare sont nécessaires (GSM – 2006). Il est donc préconisé d'installer un support tous les 7 à 10 mètres afin de multiplier les microsites favorables.

Chantiers pilotes en DT Auvergne-Rhône-Alpes

La technique de la régénération sur bois mort n'ayant pas été réellement testée en France, l'implantation de chantiers pilote a été proposée dans les Alpes, avec prise en charge des coûts par le département RDI. L'objectif de ces chantiers est d'avoir une première évaluation de la faisabilité, du coût et de l'efficacité de la méthode, grâce à un suivi sur le moyen terme. Ces chantiers de préparation à la régénération naturelle sur bois mort se sont déroulés selon un mode opératoire précis décrit en encadré.

En 2018 et 2019, 4 chantiers pilotes ont été implantés en Savoie et 2 en Isère, au sein de peuplements variés : mélézins et pessières de l'étage subalpin ou montagnard. Un suivi conjoint entre l'Agence travaux, le RATD Auvergne-Rhône-Alpes et le pôle RDI de Chambéry a été mis en place dans l'optique d'avoir une estimation du rendement, un suivi de la décomposition des rondelles et un suivi de l'installation des semis.

Sur chaque chantier, une trentaine d'îlots de bois mort ont été repérés au GPS Trimble et précisément caractérisés (nombre et dimension des rondelles, état de décomposition). Ainsi, rien qu'en Savoie, 114 îlots ont été qualifiés sur les 287 créés.

Mode opératoire des travaux préparatoires à la régénération naturelle sur bois mort

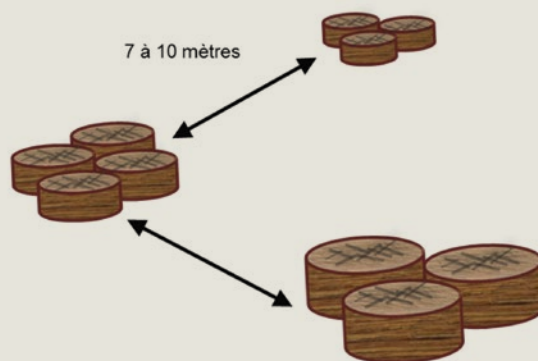
- 1. Repérer un vieux chablis** ou une souche haute, d'épicéa de préférence, en amont de la zone à régénérer. Diamètre optimum : 30 à 50 cm. Choisir si possible des chablis anciens, dont le processus de décomposition est déjà avancé pour gagner du temps sur l'apparition des semis.
- 2. Scarifier profondément** (2 à 3 cm) la section à découper par 4 ou 5 traits de tronçonneuse. Ces stries permettent d'accélérer la décomposition du bois. Des débris végétaux s'y accumulent et se dégradent rapidement, créant ainsi un terreau fertile et les graines se calent dans les fentes créées.



- 3. Tronçonner en rondelles** ou quartiers de 10 à 15 cm d'épaisseur. Les quartiers sont préférables pour éviter de toucher le sol avec le guide chaîne et pour éviter de faire rouler le chablis en le tronçonnant.



- 4. Disposer les rondelles** par groupes de 3 ou 4 sur la zone à régénérer à raison d'un groupe, qu'on appelle un îlot (= un support de régénération), tous les 7 à 10 mètres. Bien caler les rondelles. Les placer de préférence à l'aval d'une aspérité du terrain. Surface à couvrir : 0,5 à 1 m².



Bois frais
conducteur de sève.



Bois dur
sans sève, ferme ; le couteau ne pénètre que très difficilement dans le sens des fibres.



Bois pourri
moins ferme ; le couteau pénètre facilement dans le sens des fibres, mais non en travers.



Bois en décomposition
tendre ; le couteau pénètre facilement dans tous les sens.



Bois vermoulu
très spongieux et pulvérulent ; quasi absence de cohésion.



L'analyse des données nous permet d'obtenir les caractéristiques moyennes d'un îlot réalisé lors de ces premiers chantiers :

- surface d'un îlot : 0,75 m².
- nombre de rondelles par îlot : 5 à 6 (soit un peu plus que prévu par le mode opératoire)
- épaisseur des rondelles : 11 cm
- diamètre d'une rondelle : 37 cm
- 5 à 6 stries par rondelle.
- l'état du bois mort est noté entre bois dur et bois pourri, selon la méthode de qualification de l'inventaire forestier national Suisse (Fig.1).

Rendements

Il est très difficile d'établir un rendement sur les 4 chantiers expérimentaux réalisés en Savoie à l'automne 2018 : la technique étant toute nouvelle, l'organisation et l'efficacité du chantier ne sont pas optimales. Certains points ont néanmoins déjà été mis en évidence :

- Le travail productif représente environ deux tiers du temps de travail total. Le tiers restant se partage entre les pauses, les déplacements, l'entretien du matériel et les temps d'échanges sur cette nouvelle technique.
- En moyenne, 25 minutes sont nécessaires pour mettre en place un îlot de régénération (temps de tronçonnage + mise en place des rondelles = temps de travail productif ; figure 2). Cette durée est très variable d'un chantier à l'autre en fonction de la pente, de l'encombrement, des déplacements, de la disponibilité en chablis, etc. Ce rendement très faible est aussi dû à la découverte et à l'apprentissage de la technique.
- Même en imaginant augmenter significativement le rendement, la technique reste coûteuse ; sur ces premiers chantiers, les coûts sont un peu supérieurs à ceux d'un travail du sol, mais il conviendrait de réaliser des chronométrages plus précis pour proposer des fourchettes de prix.
- Cette technique est donc à réserver aux cas où aucune autre méthode ne peut être mise en place : trop de pente, trop d'éboulis ou d'encombrement, trop faible surface pour mettre en œuvre un chantier mécanisé de travail du sol ou une plantation.
- Pour augmenter la disponibilité du matériau bois servant à l'installation des supports, on peut imaginer laisser plus de rémanents en forêt, en augmentant notamment le diamètre de découpe fin bout jusqu'à par exemple 30 cm au lieu des 14 ou 20 cm couramment admis. Le volume perdu serait minime au regard de la biomasse laissée au sol. Cette pratique pourrait même, sans aller jusqu'à la création de rondelles, engendrer plus de supports naturels, mais qui se dégraderont plus lentement et seront donc moins rapidement efficaces.

Figure 1. Détermination du stade de décomposition à l'aide de la méthode du couteau suisse, selon l'Inventaire forestier national Suisse.

Source : <https://totholz.wsl.ch/fr/bois-mort/decomposition-du-bois/determiner-le-stade-de-decomposition.html>



Figure 2. Préparation de rondelles sur un chablis et mise en place d'un îlot en FC d'Arvillard (73), parcelle 18 – automne 2018.

Première évaluation de l'efficacité et perspectives d'utilisation

Les relevés de position des îlots ont été faits au printemps suivant la réalisation du chantier. Les stries pratiquées dans les rondelles étaient à moitié remplies de débris végétaux, d'aiguilles de résineux en voie d'humification. Des semis d'épicéa et d'érable ont d'ores et déjà été observés (Fig. 3). Même si le degré de décomposition des bois ne permettra sans doute pas à ces semis d'implanter un système racinaire et de survivre sur le long terme, ces premières observations sont très encourageantes. Seuls les suivis qui seront réalisés dans les prochaines années permettront de quantifier plus précisément les résultats en termes d'acquisition de régénération.

En l'état de nos connaissances techniques et économiques sur ce type de travaux, il paraît difficile de généraliser cette méthode si la question de la rentabilité économique est prépondérante. Cela reste néanmoins un outil supplémentaire à disposition du gestionnaire forestier pour déclencher la régénération naturelle, dans des contextes peu propices et avec des attentes fortes en termes de maintien du couvert forestier. Il est donc sans doute préférable pour le moment d'orienter l'utilisation de cette technique dans des contextes pouvant bénéficier de sources de financement autres que la seule vente de bois (forêt de protection, captage d'eau potable...).



Figure 3. Semis d'épicéa en FD de Belle Plinier et en FC d'Arvillard, au printemps 2019, 1 an après la réalisation du chantier.

Références

- Bernier N., 2005 - Pessières montagnardes et subalpines : la zonation expliquée par la décomposition des humus et du bois mort. In : Vallauri D., André J., Dodelin B., Eynard-Machet R., Rambaud D., Bois mort et à cavités : une clé pour des forêts vivantes. Paris : Lavoisier. Tec & Doc, pp. 99-105
- Fuhr M., Weyant J., Durand N., Riond C., 2015. Dynamique de fermeture des grandes trouées dans les forêts de montagne des Alpes du Nord. Rendez-vous techniques ONF n°47, pp. 3-10
- Garet E., 2017. Etat des lieux de l'utilisation du bois mort au sol. Mémoire de stage fin de 3e année FIF-AgroParisTech. Nancy: AgroParisTech. Sion (Suisse): Service des forêts, des cours d'eau et du paysage du Canton du Valais. 110 p.
https://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=193452
- Gauquelin X., Courbaud B. (coord.), 2006. Guide des Sylvicultures de Montagne Alpes du Nord françaises. Cemagref – CRPF Rhône-Alpes – ONF. 278 p.
- Gensac P., 1990 – Régénération en altitude de l'épicéa (*Picea abies* (L) Karst) sur les souches dans les Alpes françaises – Annales des Sciences forestières vol.47(2) pp. 173-182
- Stöckli B., 1995 – La régénération des forêts de montagne sur du bois mort – Notice pour le praticien n°26 – Birmensdorf : Institut Fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). 8p.

ÉCHECS DE RÉGÉNÉRATION DU CHÊNE EN PRÉSENCE DE MOLINIE : AU-DELÀ D'UNE SIMPLE COMPÉTITION POUR LES RESSOURCES

Marine Fernandez⁽¹⁾, Philippe Malagoli⁽¹⁾,
Antoine Vernay⁽²⁾, Thierry Améglio⁽¹⁾,
Philippe Balandier⁽³⁾

(1) Université Clermont Auvergne, INRAe, UMR 547 PIAF

(2) Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR 5023 LEHNA

(3) INRAe, UR Ecosystèmes Forestiers (EFNO), Nogent-sur-Vernisson

RÉSUMÉ

L'effet de compétition de la molinie sur les jeunes chênes est une problématique bien connue dans les forêts tempérées. La poacée est particulièrement efficace dans l'absorption de l'eau et de l'azote du sol, entraînant d'importants échecs de régénération dans les chênaies. Toutefois, les interactions entre la molinie et les tout jeunes chênes ne semblent pas se limiter à de la simple compétition pour les ressources. Des expérimentations en pot ont mis en évidence que la molinie pourrait émettre des molécules ayant un effet négatif sur la croissance du chêne. Inversement, le chêne faciliterait la croissance des molinies en relarguant rapidement de l'azote dans le sol. Cet azote capté par la molinie permet une croissance plus rapide de cette dernière en comparaison à sa croissance sans chêne. Cette étude met en évidence que les interactions entre le jeune chêne et la molinie vont au-delà de la simple compétition pour les ressources.

La présence de molinie (*Molinia caerulea*) dans les chênaies induit très souvent d'importants échecs de régénération du chêne. Les travaux de Vernay *et al.* (2018a) ont mis en évidence un phénomène de compétition qui apparaît très tôt entre la molinie et les semis de chêne sessile (*Quercus petraea*). Le développement rapide de la molinie et son système racinaire fasciculé très dense lui permettent de capter rapidement et en grande quantité l'eau et l'azote du sol. La compétition a tendance à s'intensifier dans les trouées où la croissance de la molinie est favorisée par une luminosité plus importante. La gestion de la quantité de lumière arrivant dans le sous-bois, et donc le dosage des coupes d'arbres adultes, permettrait d'optimiser, dans une certaine mesure, l'installation et le développement des semis (Vernay *et al.* 2019).

Plus généralement, la compétition pour les ressources, ou « compétition par exploitation », a longtemps monopolisé l'attention. La disponibilité des ressources et les stratégies d'acquisition mises en place par les plantes ont jusqu'à présent été considérées comme le principal moteur de la dynamique des communautés végétales. Or il est aussi établi que les plantes sont capables de produire et libérer des molécules dans leur environnement, notamment dans le sol.

L'émission de telles substances au niveau des racines s'appelle rhizodéposition (terme qui inclut la libération de matières organique par les racines mortes ; Fig. 1). Lorsque ces composés nuisent au développement et à la survie des voisins, on parle d'allélopathie. L'allélopathie est une « compétition par interférence » dans la mesure où elle ne concerne pas les ressources, mais exerce une action négative sur les plantes voisines via des molécules chimiques.

Les propriétés allélopathiques de la molinie ont rarement été démontrées. Cependant elles pourraient avoir un rôle important dans le dépérissement des jeunes chênes en ciblant des acteurs majeurs de leur développement : le mycélium des champignons qui forment avec les racines des arbres les associations symbiotiques appelées mycorhizes.

Généralement les mycorhizes favorisent le développement en augmentant la capacité d'absorption de l'eau et des minéraux indispensables à la croissance du végétal qui, en échange, fournit la matière organique issue de la photosynthèse foliaire. À ce jour, une seule étude a mis en évidence les effets négatifs de la molinie sur la biodiversité fongique du jeune chêne, et il s'agissait de chêne rouge d'Amérique (Timbal *et al.* 1990).

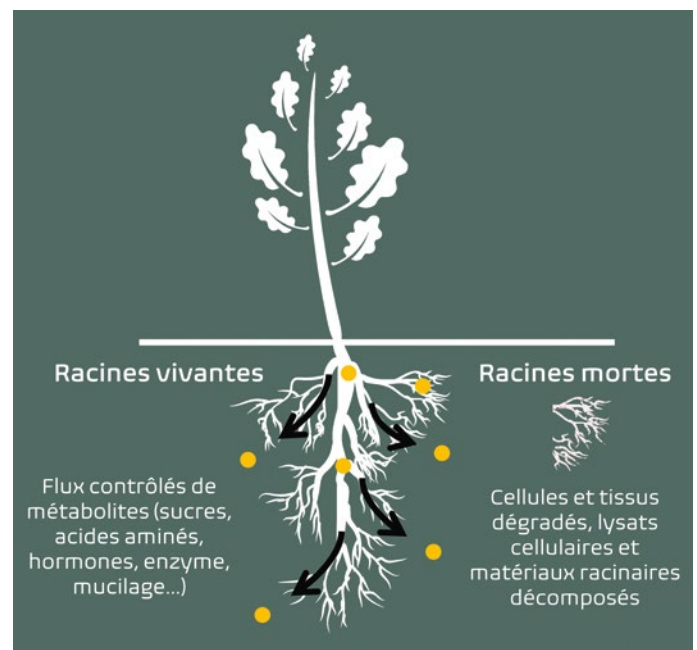


Figure 1. Schéma représentant les principaux mécanismes de la rhizodéposition.

Les flèches indiquent le flux sortant de métabolites (cercles orange) depuis les racines vivantes vers le sol. La libération de métabolites est aussi due à la dégradation des tissus racinaires vivants et à la sénescence racinaire.

Enfin, au-delà des effets négatifs de la molinie sur le chêne, Vernay *et al.* (2018a, b) ont observé que la présence de chêne favorisait la croissance de la molinie. D'une façon générale, les processus de facilitation entre les plantes impliquent divers mécanismes : diminution des perturbations ou effet de protection (environnement, pathogènes, herbivores...) ou bien augmentation de la disponibilité des ressources, comme l'exemple bien connu des transferts de nutriments d'une plante donneuse vers une plante receveuse. Dans le cas de la facilitation de la molinie par le chêne, les travaux de Vernay *et al.* (2018a) suggèrent le rôle important de l'azote : les résultats suggèrent que le chêne, au niveau racinaire, relargue dans le sol de l'azote qui est alors absorbé par la molinie.

Notre objectif était donc d'étudier plus avant les interactions, autres que la compétition pour les ressources, entre le chêne sessile et la molinie : d'une part la compétition *via* les mécanismes allélopathiques de la molinie sur la croissance et la mycorhization des semis de chênes, et d'autre part l'effet de facilitation du chêne sur la molinie. Nous avons conçu à cette fin deux expérimentations dont les résultats, comme nous l'expliquons dans cet article, révèlent l'importance de ces autres interactions.

Hypothèses testées et dispositif expérimental

La première hypothèse testée (Expérimentation 1) est que les racines de molinie produisent et émettent dans le sol des molécules qui vont avoir un effet négatif sur la croissance et le taux de mycorhization du chêne. Le chêne est une espèce principalement ectomycorhizée, c'est-à-dire que les hyphes (filaments de mycélium) forment un manteau autour des racines de l'arbre sans en pénétrer les cellules. La seconde hypothèse (Expérimentation 2) est que le chêne, *via* la rhizodéposition, transfère de l'azote à la molinie dont il favorise ainsi la croissance. Les expérimentations ont été menées en pot afin, d'une part, de contrôler le niveau de certains facteurs comme l'eau ou la lumière et, d'autre part, de récolter la totalité des systèmes racinaires pour les mesures et de limiter les pertes d'eau et d'azote par lessivage du sol. Tous les pots ont été placés en conditions naturelles, sur le domaine expérimental de l'UMR PIAF, site INRAe de Clermont-Ferrand (Photo A). L'ensemble des chênes (*Quercus petraea*), issus d'une pépinière locale, étaient âgés de 1 an à la plantation. Pour travailler dans des conditions aussi proches que possible des conditions naturelles, les touffes de molinie (l'expression « les molinies » sera utilisée pour la suite de cet article) et le sol ont été prélevés dans une chênaie à molinie en forêt de Paray-le-Frésil (Allier, Photo B). Le sol (luvisol typique-rédoxisol à pseudogley de nappe d'eau perchée à 30 cm de la surface, oligosaturé, sablo-limoneux devenant limono sablo-argileux à 50 cm de profondeur, issu de colluvions de formations sableuses des sables et argiles du Bourbonnais) a été tamisé pour retirer les éléments grossiers pouvant perturber la croissance racinaire.

Pour l'**expérimentation 1** (Fig. 2), 16 chênes et 12 molinies ont été plantés seuls dans des pots de 5L en avril 2017. Chaque semaine, à partir du mois de juin, une molinie a été prélevée et seul son système racinaire a été conservé. Les racines restent vivantes et continuent de rhizodéposer quelques jours après avoir été séparées des parties aériennes. Après lavage doux, le système racinaire de la molinie a été pesé et mis à macérer dans de l'eau pendant 48h afin d'obtenir une solution d'exsudat.

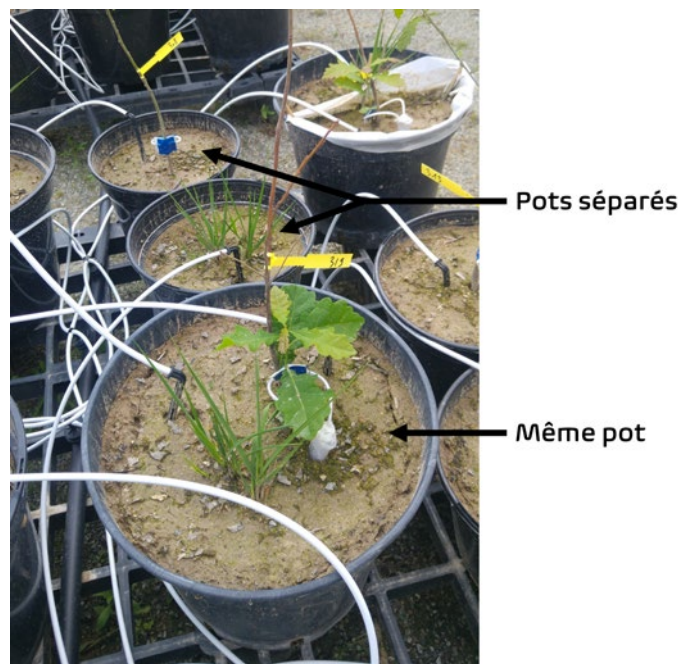


Photo A. Chêne et molinie dans un « même pot » ou en « pots séparés ».

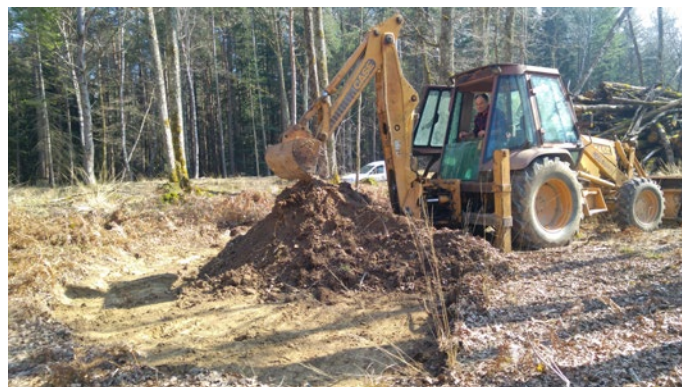


Photo B. Récolte des couches supérieures du sol par Monsieur Charrier à Paray-le-Frésil.



Figure 2. Chênes ayant reçu de l'eau (à gauche) et chênes ayant reçu des exsudats racinaires de molinies (à droite).



Figure 3. Modalités chêne-molinie en « pots séparés » (à gauche) et dans le « même pot » (à droite).

La moitié des chênes (8) ont reçu chaque semaine un volume équivalent de solution d'exsudats racinaires de molinie (2 %), les 8 autres ont reçu un même volume d'eau, directement appliqué sur le sol (Fig. 3). Les 16 chênes ont été récoltés au mois d'août après 12 semaines consécutives d'apports. Les parties aériennes et le système racinaire ont été séparés puis séchés et pesés.

Pour l'**expérimentation 2** (Fig. 3), 16 chênes et 16 molinies ont été plantés seuls dans des pots de 5L et 16 autres chênes ont chacun été placés avec une touffe de molinie dans un pot de 10L, en avril 2017. Afin d'identifier et de quantifier les transferts d'azote du chêne vers la molinie, de l'urée marquée au ^{15}N , un isotope lourd de l'azote naturel, a été apportée au mois de juin 2017 à la totalité des 32 chênes par la méthode du cotton-wick (Encadré, Fig. 4). À chaque saison à partir de l'été 2017, une récolte (représentant un quart de l'ensemble des pots) a été effectuée pour tenir compte du cycle de vie des plantes et des processus de sénescence racinaire. Pour chaque récolte, la partie aérienne et le système racinaire des plantes ont été séparés. La totalité du système racinaire a été récoltée à l'aide d'un tamis permettant le passage du sol et sa récupération dans un récipient. Une partie du système racinaire du chêne a été placée dans des sacs plastiques et conservée à -20°C afin d'être utilisée pour quantifier les mycorhizes. Le reste du système racinaire, les parties aériennes ainsi qu'une partie du sol ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 48h. Le poids sec a été déterminé puis chacun des échantillons a été broyé en une fine poudre et envoyé à l'analyse au spectromètre de masse afin de mesurer la teneur en azote et l'abondance en ^{15}N .

Le marquage à l'isotope ^{15}N : méthode du cotton-wick

La méthode du cotton-wick (« fil de coton ») a été mise au point par Russell et Fillery en 1996. Elle consiste à perfuser les plantes pour leur apporter une solution souhaitée. Les étapes détaillées du cotton-wick sont présentées en figure 4. Le fil de coton est inséré transversalement dans la tige permettant le contact avec les faisceaux conducteurs (xylème et phloème). Les deux extrémités du fil baignent ici dans une solution d'urée marquée avec un isotope stable de l'azote (^{15}N), qui, par capillarité, va imbiber la totalité du fil et être absorbée par la plante.

L'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) est une molécule azotée qui résulte d'un processus de dégradation des protéines. Elle est considérée comme la forme d'azote la plus appropriée pour le marquage des plantes en raison de sa polarité, de son absorption rapide, de sa faible phytotoxicité et de sa solubilité élevée. Dans la nature le ^{15}N est présent en quantité très faible. L'excès de ^{15}N dans la plante et le sol suite au marquage permet donc de tracer la mobilité des molécules azotées marquées dans le système sol – plante.

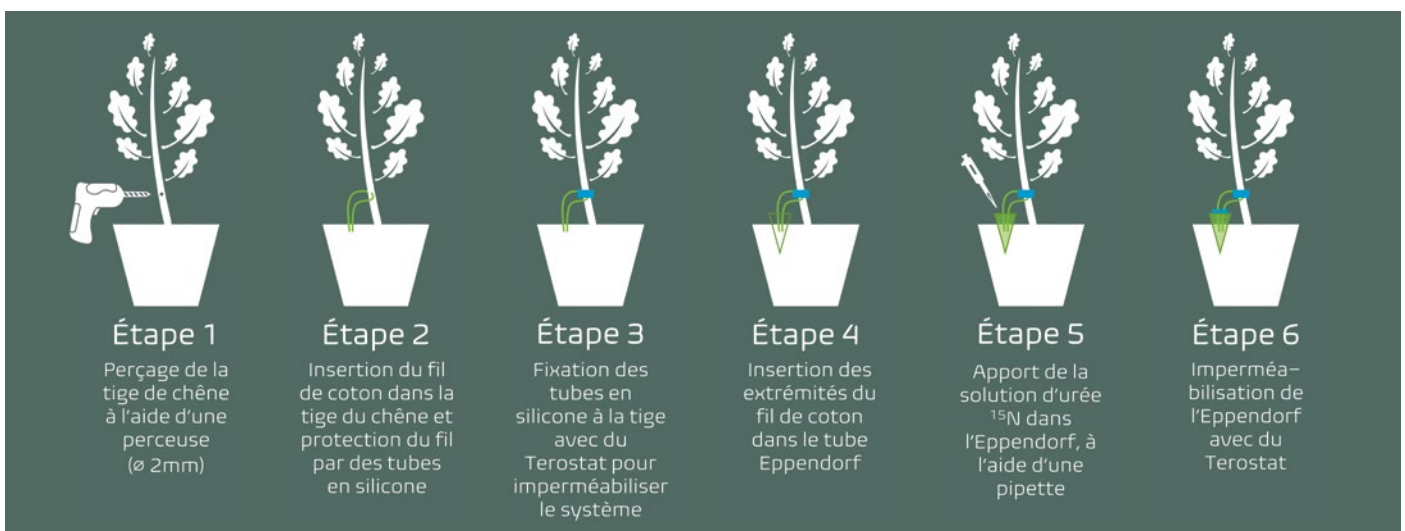


Figure 4. Les différentes étapes de l'installation du cotton-wick.

Résultats - Effets de la molinie sur le chêne

Effet négatif des exsudats racinaires de molinie sur la croissance des chênes

L'application d'exsudats racinaires de molinie a eu un effet négatif significatif sur la croissance des chênes (Fig. 5). La biomasse racinaire des chênes ayant reçu des exsudats racinaires de molinie est deux fois plus faible qu'en l'absence d'exsudats. Les parties aériennes sont relativement moins impactées malgré une diminution de biomasse d'un facteur 1,8.

Cette forme de compétition exercée par la molinie sur le chêne résulte vraisemblablement de l'action de molécules allélopathiques. Ces résultats soulignent que la compétition de la molinie sur le chêne ne s'explique pas uniquement par la compétition pour les ressources du sol. Si la molinie a des capacités intrinsèques d'acquisition de l'eau et des nutriments (tels que l'azote) supérieures à celles du chêne, elle lui nuit aussi en produisant des composés allélopathiques au niveau racinaire. Les molécules impliquées et leurs mécanismes d'action restent à identifier pour mieux définir les processus-cibles de ces molécules, qui pourraient concerner notamment la modulation du taux de mycorhization des racines du chêne.

Effet négatif de la présence de molinie sur le taux d'ectomycorhization des chênes

Une étude portant sur l'effet de la molinie sur le jeune chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*) a mis en évidence une modification de la diversité ectomycorhizienne du chêne en présence de molinie : les champignons réputés efficaces dans l'absorption des nutriments étaient moins nombreux tandis que les espèces moins efficaces étaient plus

abondantes qu'en l'absence de molinie (Timbal et al. 1990). Les auteurs concluent à la probable émission de molécules allélopathiques ciblant les ectomycorhizes du chêne.

Dans notre étude, la présence de molinie dans le même pot qu'un chêne a induit une diminution d'environ 33 % du nombre de racines latérales chez le jeune plant, mais aussi et surtout une diminution de près de 41 % du nombre de mycorhizes rapporté au nombre de racines latérales (Fig. 6, photo C). À ce stade de l'étude, la diminution observée peut s'expliquer par deux hypothèses majeures : (i) la présence de molinie entraîne une diminution de la quantité de nutriments dans le pot et provoque une diminution de la croissance, du développement des racines latérales ainsi

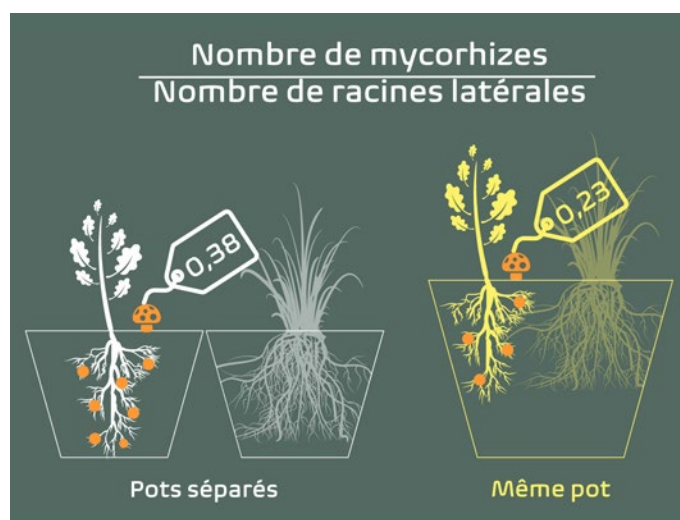


Figure 6. Nombre d'ectomycorhizes par rapport au nombre de racines latérales des chênes seuls en pot (blanc) et ceux dans le même pot que la molinie (jaune).

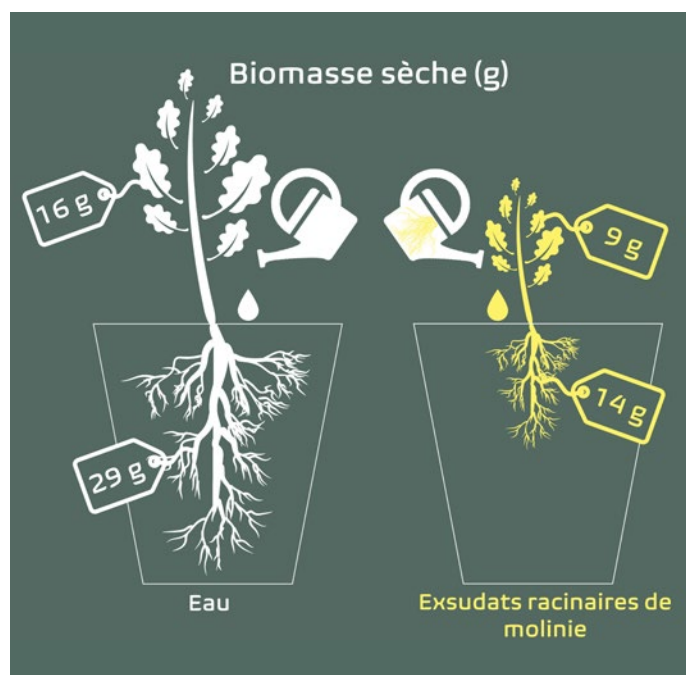


Figure 5. Biomasse (g) des parties aériennes et des racines des chênes ayant reçu de l'eau (blanc) et ceux ayant reçu une solution d'exsudats racinaires de molinie (jaune).

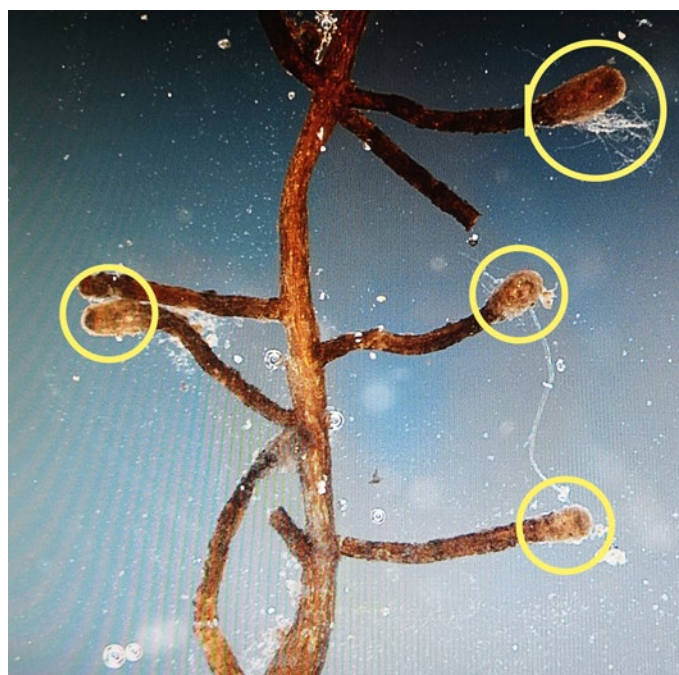


Photo C. Ectomycorhizes (entourées en jaune) sur les racines latérales de chêne.

que de la colonisation par les champignons ectomycorhiziens ; (ii) les racines de molinie libèrent des composés allélopathiques qui inhibent spécifiquement l'initiation et la croissance des racines latérales ainsi que la colonisation par les champignons mycorhiziens. Dans tous les cas, la présence de molinie réduit la colonisation du chêne par les ectomycorhizes.

Bilan : la molinie exerce une compétition par interférence sur le chêne

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation 1 mettent en évidence que la molinie nuit à la croissance des jeunes chênes par le biais de processus différents en ciblant plusieurs éléments possiblement en chaîne. Longtemps, on a pensé que la molinie exerçait simplement sur le chêne une compétition par exploitation des ressources, grâce à des capacités d'acquisition racinaire supérieures. Ici, nous avons démontré que l'apport d'exsudats racinaires de molinie altérerait aussi la croissance du chêne, ce qui suggère des propriétés allélopathiques et donc une compétition par interférence venant certainement intensifier la compétition par exploitation. La diminution du taux d'ectomycorhization renforce cette hypothèse et soulève de nouvelles questions. Quelles sont les parts respectives de la compétition par exploitation et par interférence ? Quelle(s) forme(s) de compétition explique(nt) la diminution du taux d'ectomycorhization ? Une autre possibilité serait que la molinie produit des composés chimiques nocifs pour les champignons et/ou pour le processus de colonisation racinaire.

Résultats - Transfert d'azote du chêne vers la molinie

Très rapidement, du ^{15}N issu du marquage des chênes par la technique du « cotton-wick » est mesuré dans la molinie voisine (Fig. 7). La présence de ^{15}N dans les molinies en « pots séparés » (Fig. 7.a.) suggère qu'il y a un transfert par des composés volatils d'azote provenant des parties aériennes du chêne, même si les quantités mesurées dans notre étude restent infimes. Pour les molinies placées dans le même pot qu'un chêne, la quantité de ^{15}N est beaucoup plus importante, soulignant que le sol est une voie majeure de transfert d'azote.

En été, 2 mois seulement après le marquage, environ 15 % du ^{15}N total se retrouve dans le sol et 3,6 % dans la molinie. À la fin de la période de croissance en *automne*, la quantité de ^{15}N dans la molinie est supérieure à ce qui a été mesuré à l'été. Mais contrairement à l'été, le ^{15}N est plus abondant dans les racines que dans les parties aériennes. En *hiver*, la quantité de ^{15}N diminue dans la molinie mais elle augmente dans le sol, traduisant la libération d'azote par sénescence racinaire et le repos végétatif des plantes qui n'absorbent plus, ou quasiment, les nutriments. Ceci s'observe aussi dans les pots où le chêne est seul (Fig. 7.a.). Au *printemps*, le ^{15}N réaugmente dans la molinie reflétant la reprise de croissance et d'absorption.

Ces résultats montrent que le chêne rhizodépense rapidement de l'azote qui est aussitôt transféré dans le sol et absorbé par la molinie.

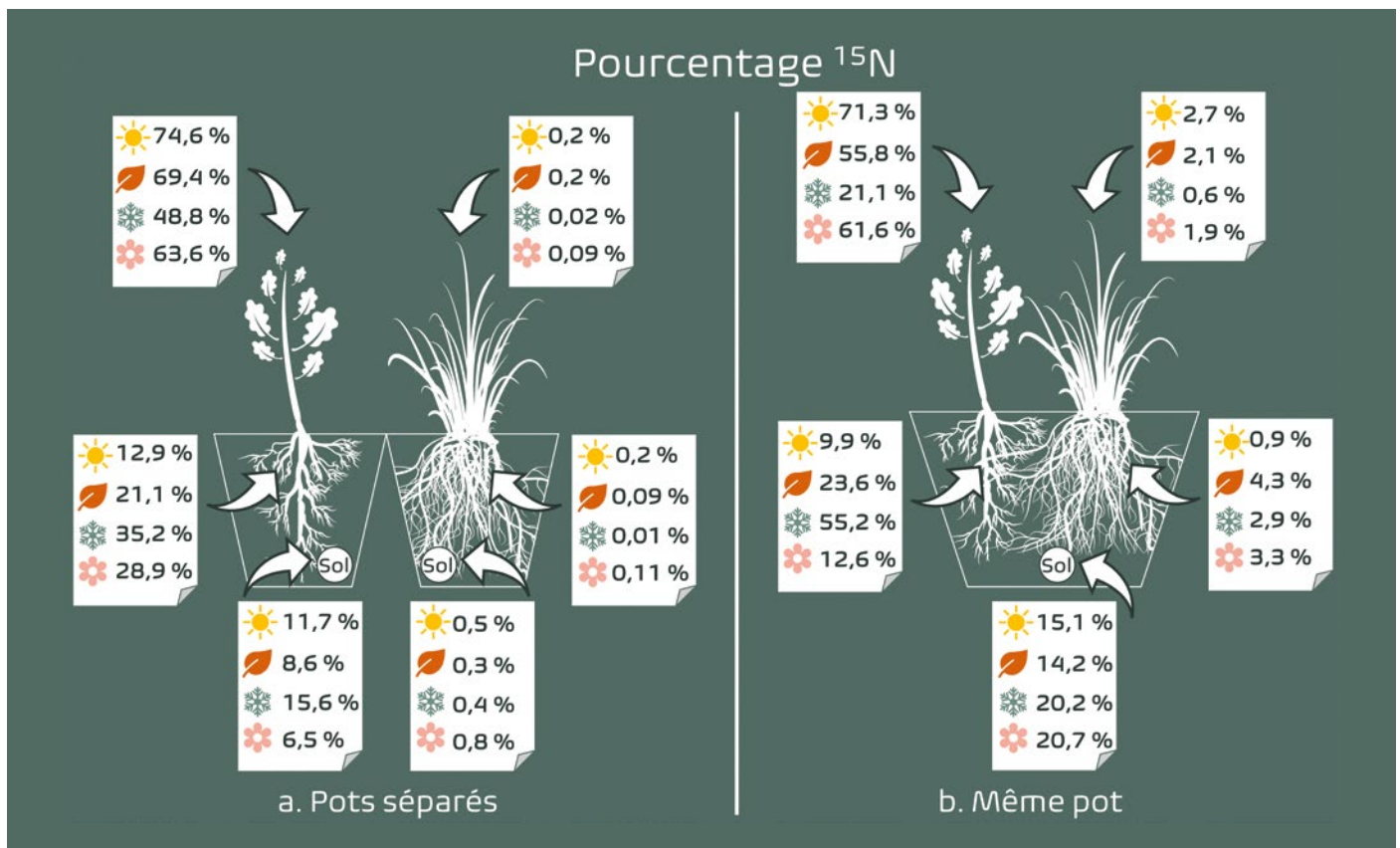


Figure 7. Pourcentage de ^{15}N dans les différents compartiments (parties aériennes, racines et sol) dans les chênes et les molinies en pots séparés (a) et en même pot (b) pour chaque saison (☀️ été, 🍂 automne, ❄️ hiver et 🌸 printemps).

Modification de l'allocation d'azote chez le chêne : une stratégie de survie ?

Que le chêne soit en « pot séparé » ou dans le même pot qu'une molinie, la dynamique d'azote entre les parties aériennes et les racines sont les mêmes : diminution de l'été à l'hiver dans les parties aériennes puis augmentation au printemps, tandis que dans les racines il y a augmentation jusqu'à l'hiver et une diminution au printemps. En revanche, si les dynamiques sont identiques, les amplitudes de mouvement sont différentes. En présence de molinie, l'allocation d'azote vers les racines de l'été à l'hiver est beaucoup plus importante (Fig. 7.b.). Au printemps, l'azote est rapidement et fortement réalloué aux parties aériennes. De plus, contrairement à la modalité « pots séparés », une quantité importante d'azote est présente dans le sol.

Ces observations soulèvent des questions concernant le rôle des interactions dans la physiologie des plantes. En effet, la présence de molinie accentue la stratégie de conservation de l'azote chez le chêne : le fait de l'allouer massivement vers ses racines en hiver va lui permettre au printemps suivant de le remobiliser vers les parties aériennes pour assurer le développement foliaire. Cette stratégie est d'autant plus manifeste que l'azote du sol est limitant, comme c'est le cas en présence de molinie (Vernay *et al.* 2018b). Toutefois, cette stratégie consistant à puiser dans ses propres réserves d'azote est peu viable sur le long terme : pour sa croissance, le chêne aura besoin de puiser de l'azote dans le sol qui aura été rendu très limitant voire indisponible par la molinie.

Le fait que le chêne rhizodépense une quantité d'azote plus importante en présence de molinie, malgré le fait que cette ressource soit vraisemblablement limitante, suppose que la présence de la molinie a pour effet d'accroître la rhizodéposition d'azote par le chêne. À ce jour, nous ne savons pas comment ce processus est contrôlé. Une hypothèse serait que la molinie émet de manière directe ou indirecte des composés qui induiraient la libération plus importante d'azote par les racines du chêne, par exemple en modifiant la chimie du sol.

Enfin, comme il l'a été suggéré précédemment, la diminution globale de la quantité d'azote chez le chêne peut s'expliquer par la diminution de la disponibilité en azote du sol mais aussi par la diminution du nombre de mycorhizes qui ont un rôle important dans l'absorption des nutriments par les plantes. L'ensemble de ces modifications affectent considérablement la croissance du chêne et sur le long terme, sa survie. De plus, ces analyses, comme celles de Vernay *et al.* (2018a), ont mis en évidence une biomasse supérieure de l'herbacée en présence de chêne et un rôle majeur de l'azote dans ce processus de facilitation.

Avantage des transferts d'azote du chêne sur la croissance de la molinie

L'analyse des biomasses de molinie en présence et en absence de chêne (Fig. 8) a mis en évidence que le chêne facilitait le développement de la molinie, confirmant les travaux de Vernay *et al.* (2018b). En été, lors de la première mesure saisonnière, les biomasses sèches des molinies en « pots séparés » et dans le même pot qu'un chêne sont identiques. En revanche dès l'automne, la biomasse des parties aériennes des molinies placées dans le même pot qu'un chêne est supérieure à celle des molinies seules, et elle le reste à l'hiver et au printemps, où elle devient même près de 2 fois plus importante. La biomasse racinaire des molinies avec un chêne est supérieure à partir de l'hiver mais non significativement d'un point de vue statistique.

Les transferts d'azote du chêne vers la molinie sont positivement corrélés avec la biomasse de la molinie (Fernandez *et al.* 2020), mettant en évidence que ces transferts rapides sont en grande partie responsables de l'effet de facilitation du chêne sur la molinie.

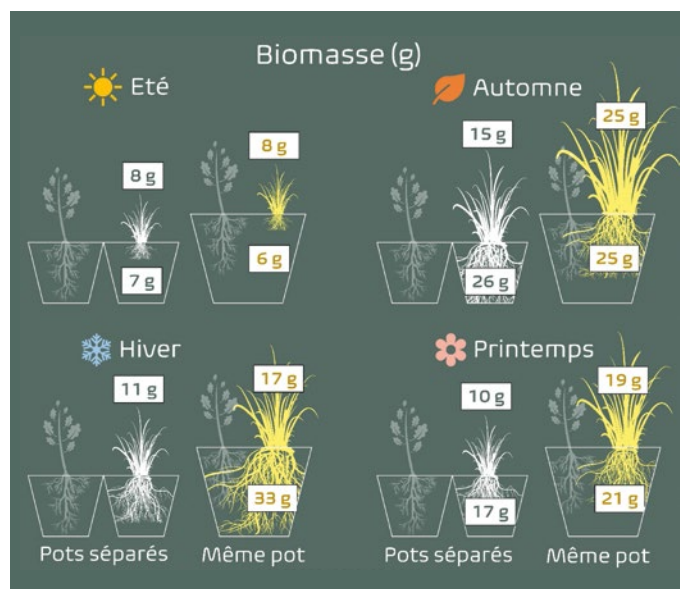


Figure 8. Biomasse (g) des molinies en pots séparés (blanc) et en même pot (jaune) qu'un chêne pour chaque saison.

Que se passe-t-il *in situ* ?

Nos expérimentations, réalisées en pot et non *in situ*, en forêt, excluent de fait des facteurs qui peuvent influencer les interactions chêne-molinie. La présence des adultes ainsi que la quantité de lumière ont été décrites comme des facteurs majeurs dans la compétition de la molinie sur le chêne (Vernay *et al.* 2019). Mais ces facteurs peuvent également intervenir dans la facilitation. On peut se demander par exemple si la présence d'adultes ou la luminosité favoriseraient la mycorhization des semis. La densité de molinie est aussi un facteur à prendre en considération dans la mesure où chacune des touffes peut se nuire mutuellement (Vernay 2017).

Ceci dit, il faut souligner la rapidité des interactions chêne-molinie : (i) la molinie capte massivement l'azote du sol aussitôt que ses racines sont actives et les résultats obtenus ici montrent qu'en outre, (ii) la molinie libère des composés racinaires ayant un effet négatif sur la croissance du chêne, (iii) la présence de l'herbacée nuit également à la mycorhization du chêne. À ces effets de compétition de la molinie sur le chêne, viennent s'ajouter (iv) des effets rapides de facilitation du chêne sur la molinie via des transferts d'azote, permettant à cette dernière d'accroître sa biomasse. Cette interaction atypique faisant intervenir compétition de la molinie sur le chêne et facilitation de la molinie par le chêne se nomme « antagonisme » (Fig. 9). Aujourd'hui il semblerait que la gestion la plus efficace de la régénération dans les chênaies à molinie impose de réduire drastiquement l'abondance de l'herbacée. L'objectif final étant de permettre aux jeunes chênes de mieux composer avec les effets négatifs de la molinie ou, au moins, de leur permettre de partiellement s'affranchir de ces effets négatifs. En pratique, la solution sylvicole préventive consiste à doser l'éclaircissement, de façon que les semis de chêne puissent bien s'installer avant que la molinie devienne envahissante (Vernay *et al.* 2019). Enfin, une solution -délicate et coûteuse- serait l'intervention curative par décapage mécanique de la molinie.

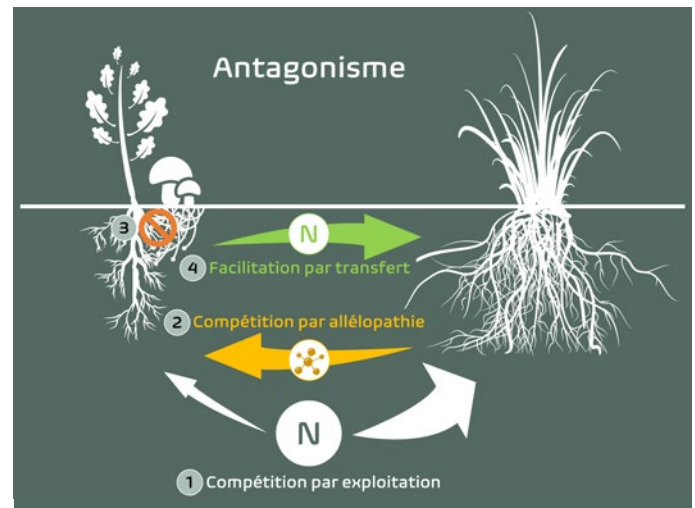


Figure 9. Schéma bilan des différentes interactions entre le chêne et la molinie.

1. Compétition par exploitation ; 2. Compétition par interférence (allélopathie) ; 3. Effet négatif de la molinie sur les mycorhizes du chêne et 4. Facilitations par les transferts d'azote.

Références

- Fernandez M, Malagoli P, Vernay A, 2020. Below-ground nitrogen transfer from oak seedlings facilitates Molinia growth : 15 N pulse-chase labelling. *Plant and Soil* vol. 449 pp. 343–356
- Timbal J, Gelpé J, Garbaye J, Courrier G, 1990. Étude préliminaire sur l'effet dépressif de la molinie (*Molinia caerulea*) sur la croissance et l'état mycorhizien de semis de chêne rouge (*Quercus rubra*). *Annals of Forest Science* vol. 47(6) pp.643–649
- Vernay A, 2017. De la complexité fonctionnelle et écophysiologique des ressources lumière, azote et eau dans le réseau précoce d'interactions entre le jeune chêne et deux poacées : conséquences pour la régénération des chênaies tempérées. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1
- Vernay A, Malagoli P, Fernandez M, *et al.*, 2018a. Improved *Deschampsia cespitosa* growth by nitrogen fertilization jeopardizes *Quercus petraea* regeneration through intensification of competition. *Basic and Applied Ecology* vol. 31 pp. 21–32. doi: 10.1016/j.baae.2018.06.002
- Vernay A, Malagoli P, Fernandez M, *et al.*, 2019. Régénération du chêne en compétition avec la molinie : un délicat dosage des ressources en eau et en lumière. *Rendez-vous Techniques ONF* n° 61–62 pp.3–10
- Vernay A, Malagoli P, Fernandez M, *et al.*, 2018b. Carry-over benefit of high internal N pool on growth and function of oak seedlings (*Quercus petraea*) competing with *Deschampsia cespitosa*. *Forest Ecology and Management* vol. 419–420 pp. 130–138. doi: 10.1016/j.foreco.2018.03.039

AMÉLIORER LA RÉUSSITE DE LA RÉGÉNÉRATION NATURELLE DU PIN MARITIME DANS LES FORÊTS DUNAIRES D'AQUITAINE

Francis Maugard

ONF, agence Landes Nord-Aquitaine, Mission littorale aquitaine

Clément Magnin

AgroParisTech et ONF, agence Landes Nord-Aquitaine

Depuis une vingtaine d'années, le renouvellement traditionnel des pinèdes de la forêt dunaire aquitaine connaît dans certains secteurs des échecs répétés. Forestiers et chercheurs se sont associés pour objectiver le constat, élucider les causes et proposer des solutions : leurs approches conjuguées sont exposées ici et dans l'article suivant.

En Nouvelle-Aquitaine, la forêt des Landes de Gascogne représente un intérêt économique important auquel la forêt littorale contribue pour une part non négligeable, même si elle doit plutôt sa notoriété à la protection contre l'érosion dunaire, à la préservation de la biodiversité ou à ses attraits touristiques.

La forêt littorale dunaire de Gascogne, composée essentiellement de pin maritime, s'étend sur environ 240 km de l'estuaire de la Gironde à l'embouchure de l'Adour, sur une largeur de 4 à 6 km. Depuis ses origines remontant au 19^e siècle, elle est traitée en futaie régulière, ce qui convient bien à l'essence pionnière qu'est le pin maritime. Cette région naturelle est boisée à plus de 82 % avec 96.000 ha de forêts, dont plus de 52 000 ha de forêts publiques, répartis sur les 15 forêts domaniales littorales.

Le renouvellement s'y fait par régénération naturelle, ce qui permet notamment de conserver diversité génétique et capacité d'adaptation au changement climatique. Cependant depuis 20 ans environ, les gestionnaires ont constaté l'échec croissant de la régénération naturelle dans certains secteurs dunaires.

Quels sont les facteurs en cause ? Climat, qualité des graines, humidité du sol, pression des herbivores ? Et quelle est l'incidence des pratiques sylvicoles ? Les chercheurs d'INRAE, en collaboration avec des collègues de l'ONF et de Bordeaux Sciences Agro, ont lancé en 2015 le projet Ecodune (Écologie de la régénération naturelle du pin maritime dans les forêts de dune d'Aquitaine) pour identifier les mécanismes impliqués et proposer des itinéraires de gestion pour favoriser le renouvellement de ces pinèdes. L'ONF a diligenté une analyse des sommiers des forêts concernées pour étudier l'effet des pratiques sylvicoles actuelles sur le niveau de réussite des régénérations. De son côté, INRAE a conduit une démarche expérimentale pour identifier les processus écologiques responsables des échecs.

Les résultats du projet et leurs implications pratiques ont été présentés à Lacanau le 5 mars 2020 aux professionnels et aux partenaires institutionnels¹. Ils permettront d'actualiser les dispositions du guide

des sylvicultures des forêts littorales atlantiques dunaires (Sardin, 2009), à l'occasion d'un mémento en cours d'élaboration.

Dans ce premier article, nous précisons le contexte et la problématique, ainsi que les résultats de l'analyse des sommiers des forêts, conduite par Clément Magnin, apprenti ingénieur entre 2016 et 2019.

Une forêt récente élément majeur du territoire aquitain

La forêt dunaire, insérée entre la plage rectiligne et le chapelet des étangs d'arrière-dune, est devenue au fil de l'histoire un patrimoine exceptionnel, un paysage identitaire de l'Aquitaine.

À la fin du XVIII^e siècle, les dunes de Gascogne ne portaient que quelques îlots de forêts, sur dunes anciennes épargnées par l'envahissement des sables modernes. Le pin maritime y était naturel, en mélange avec des chênes. En 1801, un chantier colossal s'engageait avec les grands travaux de fixation des sables sous l'égide de la Commission des Dunes, et il s'intensifia de 1817 à 1862 : en moins de 45 ans les Ponts et Chaussées stabilisèrent et boisèrent plus de 80.000 ha de dunes. Boisement en pin maritime, par semis de graines récoltées localement.

Une gestion durable de la forêt dunaire qui s'inscrit dans une dynamique spontanée...

Aujourd'hui, la préservation renforcée de la biodiversité et la production accrue de bois, comme éco-matériau et source d'énergie renouvelable, sont au cœur des choix stratégiques de l'ONF pour la gestion **durable et multifonctionnelle** des forêts domaniales du littoral aquitain. Durable car il s'agit bien de préserver la capacité du massif dunaire à assurer demain encore ses fonctions écologiques, économiques et sociales, sans oublier sa fonction initiale de protection contre l'érosion éolienne des sables, notamment dans le cadre des changements climatiques en cours.

¹ Résumé et présentation accessibles sur le site INRAE :

<https://www.inrae.fr/actualites/nouvelle-aquitaine-ameliorer-reussite-regeneration-naturelle-du-pin-maritime-foret-dunaire>

Dans ce contexte, cette forêt constituée de haute lutte doit continuer de se diversifier en une mosaïque de peuplements où l'essence objectif qu'est le pin maritime reste omniprésente, en mélange raisonné avec d'autres essences qui varient selon les milieux. Entre autres avantages, ce mélange aide à prévenir les dégâts causés par les ravageurs spécifiques à telle ou telle essence (insectes ou champignons pathogènes). Ainsi le pin maritime, qui domine nettement l'étage arboré, est accompagné par la dynamique des chênes (chêne pédonculé, chêne vert ou chêne liège) et d'une végétation de sous-bois de sols pauvres (genêt, arbousier, ajonc, bruyères, ciste, mousses et lichens...).

... et privilégie le renouvellement par régénération naturelle

La récolte des pins, pour l'objectif de production de bois d'œuvre de qualité, se fait entre 45 et 60 ans selon la fertilité de la station. Comme ailleurs en forêts publiques, le renouvellement privilégie la régénération naturelle. Cela présente des avantages certains par rapport à la plantation, notamment de bonnes garanties d'enracinement, d'adaptation et un meilleur développement des semis, ainsi qu'une moindre sensibilité vis-à-vis des chevreuils et des cerfs (si tant est que leurs niveaux de population restent dans des limites tolérables). La régénération naturelle présente aussi l'intérêt de conserver la diversité génétique de l'espèce et d'espérer ainsi une meilleure adaptabilité aux changements climatiques.

Difficultés de régénération en forêt littorale dunaire de Gascogne

La méthode traditionnelle de renouvellement du pin maritime dans les dunes de Gascogne (voir ci-après) est simple et efficace, avec un taux d'échec longtemps considéré comme marginal. Cependant ces échecs sont devenus récurrents depuis une vingtaine d'années. Globalement, ils concernent 20 % des régénérations sur la période 1980 – 2000, et ce taux passe à près de 25 % au cours de la période 2000 – 2018. Mais dans le détail, le phénomène n'est pas homogène sur l'ensemble de la forêt dunaire. Les difficultés se concentrent surtout dans la partie centrale des Landes, dans une zone de 11 000 ha correspondant aux forêts de Sainte-Eulalie-en-Born et de Biscarrosse qui ont connu un taux d'échec de 43 % au cours des vingt dernières années. Le phénomène est aussi observé dans une moindre mesure au Nord du bassin d'Arcachon, en particulier dans les forêts de Lacanau et Lège-Cap-Ferret où les taux d'échecs sont compris en 25 et 30 %.

Renouvellement : la méthode traditionnelle par coupe rase

Aujourd'hui encore, c'est la méthode traditionnelle de renouvellement du pin maritime qui prévaut, à savoir la régénération naturelle par coupe rase, assistée par un complément de graines dit « semis de sécurité » à raison de 3 kg voire exceptionnellement 6 kg de graines par ha (si on remonte dans le temps, c'était plutôt 10 kg). Les graines utilisées sont généralement de provenance locale (code PPA303 – Dunes atlantiques) ; depuis 2009, elles proviennent des cônes récoltés dans des peuplements dûment sélectionnés à cet effet, sur les arbres abattus en coupes d'éclaircie

et au moment de la coupe définitive. Auparavant, la réglementation et l'usage plus laxistes pouvaient parfois conduire, par commodité et économie, à ne récolter les cônes que sur les arbres abattus en coupe rase... pour produire les graines destinées au semis de sécurité.

Lorsque la végétation accompagnatrice risque d'être un obstacle à l'installation des semis, les travaux préparatoires à la régénération naturelle consistent à broyer le sous-étage juste avant la coupe. Si la végétation concurrente est très dynamique, par exemple avec un couvert continu d'arbousier, deux opérations peuvent s'avérer nécessaires : la première (dite travail sur la végétation) avant marquage de la coupe, la seconde (travail préparatoire proprement dit) juste avant son exploitation afin de bien préparer l'accueil des graines pour leur permettre une bonne germination. L'outil habituel est le débroussaillier à rouleaux lourds montés en tandem, dit rouleau landais (photo), qui réalise simultanément la destruction de la végétation et un crochitage superficiel du sol favorable à l'installation des semis. Cependant le gyrobroyeur est de plus en plus utilisé lorsqu'un travail superficiel du sol n'est pas jugé nécessaire (le simple griffage occasionné par l'exploitation et la sortie des bois peut suffire à créer les conditions d'une bonne germination).

En cas d'échec, on entreprend une régénération artificielle par semis en ligne ou plantation.



Travail débroussaillier à rouleaux lourds montés en tandem (rouleau landais) et détail de l'outil en médaillon.

Face aux échecs, la possibilité d'un itinéraire avec coupe d'ensemencement, mais...

Le guide de sylviculture en vigueur (Sardin, 2009) souligne cependant que les taux de réussite de la régénération artificielle dans les conditions difficiles de la dune sont aléatoires et que, pour limiter les risques d'échec, les efforts d'amélioration doivent plutôt porter sur la régénération naturelle, en tirant parti notamment des constatations faites après la tempête de 1999.

D'où la recommandation, pour les secteurs où la réussite est problématique, d'un itinéraire de régénération naturelle avec une coupe d'ensemencement (+ travaux préparatoires, comme précédemment) suivie après 4 à 7 ans d'une coupe définitive, pour bénéficier entre autres d'un ensemencement prolongé et d'un abri pour les jeunes plantules particulièrement sensibles aux fortes insolation estivales. Mais les gestionnaires, déconcertés par la multiplicité des causes possibles d'échec, sont restés quelque peu dubitatifs envers cet itinéraire alternatif, qui a été assez peu utilisé jusqu'ici.

Besoin de solutions sylvicoles fondées sur des causes et processus bien identifiés

De fait, de nombreux facteurs entrent en jeu dans les diverses étapes du processus de régénération. Il y a bien sûr les aspects climatiques, mais aussi les effets éventuellement contrastés d'interaction avec la végétation qui accompagne la croissance des semis. Il y a encore la pression plus ou moins bien contenue des grands mammifères ou la consommation par les rongeurs, elles-mêmes en interaction avec la végétation, et enfin l'importance des ravageurs et pathogènes ou des mycorhizes. Sans oublier l'effet possible des pratiques sylvicoles elles-mêmes. Pour sécuriser la régénération naturelle, l'objectif général du projet ECODUNE était donc de démêler les différents facteurs et d'identifier les processus écologiques responsables des échecs d'installation des semis dans certaines forêts.

Analyser les sommiers des forêts pour repérer d'éventuelles causes techniques

À l'occasion de ce projet, l'ONF s'est attaché à l'étude de l'impact des pratiques sylvicoles sur les difficultés de régénération observées dans les pinèdes littorales, en faisant une analyse rigoureuse des informations consignées dans le sommier des forêts concernées. Rappelons que le sommier de la forêt est un document essentiel de la gestion durable, destiné à conserver la mémoire des événements et des actes de gestion qui s'y sont déroulés, parcelle par parcelle.

Recueil et analyse des historiques de gestion

L'analyse des sommiers forestiers a porté sur 11 des 15 forêts domaniales littorales aquitaines, correspondant à 93 % de la surface totale. Les 4 autres ont été écartées car elles n'ont aucun objectif de production et font donc l'objet d'une gestion spécifique aux enjeux de protection et accueil du public.

Cette enquête intéressait les parcelles passées en régénération entre 1989 et 2016. Les informations exploitables obtenues concernaient quelque 450 unités de gestion (parcelles ou parties de parcelles) (voir encadré). Elles permettaient de qualifier le niveau de réussite de la régénération et de le mettre en lien avec des différents éléments de l'itinéraire sylvicole de renouvellement, telles le type, la période et la saison des travaux préparatoires, la date de la coupe de régénération et enfin la quantité de semences utilisée pour le semis de sécurité.

Les éléments d'analyse des sommiers concernent d'une part la phase des travaux préparatoires et d'autre part la phase coupe et semis de sécurité, ainsi que le planning de succession de ces opérations (mais pas la nature de la coupe, faute d'un effectif suffisant de coupes d'ensemencement). De multiples analyses ont été réalisées, dont ne sont présentés ici que les principaux résultats.

Analyser les sommiers pour apprécier l'impact des pratiques sylvicoles dans les difficultés de régénération : une démarche aussi pertinente qu'exigeante

Au-delà des processus écologiques impliqués dans les échecs de régénération, qui faisaient l'objet du projet ECODUNE, il semblait nécessaire de s'interroger aussi sur l'effet des pratiques sylvicoles. Pour cela, quoi de plus légitime que l'analyse des « sommiers de la forêt », qui constituent la mémoire des événements et des actes de gestion ?

Ce travail a donc été réalisé à partir des 26 sommiers concernant les 11 forêts domaniales principales réparties sur l'ensemble du littoral de la Gironde et des Landes, et pour la période 1989 – 2016 qui correspond au moment où une accentuation des phénomènes de difficultés de régénération a été constatée.

L'enquête lancée auprès des techniciens a permis de recueillir un millier de fiches sommier « A50J Bis », retraçant les travaux réalisés sur autant d'unités de gestion. Ces fiches ont été analysées et sélectionnées avant saisie. Pour être exploitables, il fallait en effet qu'elles répondent aux critères élémentaires suivants : bonne tenue de la fiche, présence d'informations techniques complètes et cohérentes ainsi que d'un indicateur de réussite ou d'échec de la régénération. Dans les meilleurs cas, le degré de réussite de la régénération est spécifié dans la fiche ; dans d'autre cas, l'échec ou la réussite est attesté indirectement par la mise en œuvre de travaux de reprise de régénération (travail du sol, semis) ou, au contraire, la réalisation de travaux d'amélioration de la régénération (dégagements, dépressage).

À l'issue de cette sélection minutieuse, près de 500 fiches ont été jugées satisfaisantes et saisies au format numérique. Compte tenu de la qualité des données, cet effectif a été estimé suffisant pour des tests statistiques robustes. Pour permettre des analyses statistiques poussées à l'aide du logiciel R®, ces informations « brutes » ont ensuite fait l'objet d'un gros travail d'homogénéisation et de codification, qui a nécessité pour caractériser certains aspects l'établissement de variables calculées. La base de données se compose au final de 461 individus que sont les unités de gestion et de 40 variables d'information sylvicole, qualitatives et quantitatives.

Les données recueillies et traitées ont permis de mettre en évidence l'effet de certaines pratiques sylvicoles sur le taux de réussite des régénérations. Cela confirme que les informations contenues dans des sommiers bien renseignés et bien suivis peuvent être valorisées à tout moment, et en particulier pour analyser l'effet des itinéraires sylvicoles sur l'état des peuplements forestiers.

L'effet des travaux préparatoires sur la réussite de la régénération

Les travaux préparatoires, au sens strict, réalisés avant l'exploitation de la coupe, sont notamment caractérisés par le type d'outil utilisé, leur période de réalisation et le temps restreint qui les sépare de la phase coupe – semis.

L'outil habituel est le rouleau landais. Cependant il semble qu'il ne convienne pas pour tous les types de végétation, en particulier pour les sous étages de ligneux denses (arbousier). En outre il provoque une perturbation superficielle du sol qui dans certains cas s'avère trop forte : un sable pulvérulent et appauvri en matière organique, résultat d'une intervention trop intense (double passage croisé sur sol peu encombré), n'offre pas les conditions d'une bonne germination et sa très faible capacité de rétention en eau expose les plantules à de forts risques de dessiccation. C'est pourquoi depuis quelques années le gyrobroyeur remplace le rouleau landais pour environ 10 % des surfaces.

L'analyse de la relation entre la nature des travaux préparatoires (donc le type d'outil) et la réussite des régénérations a montré que le taux de réussite de la régénération est significativement plus élevé dans les parcelles travaillées au gyrobroyeur (Fig. 1). Ce qui invite à remettre à plat les conditions dans lesquelles le rouleau landais peut être utilisé ou non.

Quant à l'effet du temps qui sépare les travaux préparatoires de la coupe ou du semis de sécurité, l'analyse montre que le délai optimal est d'au moins 2 mois. En effet, il apparaît qu'une période de repos trop brève (environ 1 mois) diminue de 10 points le taux de réussite de la régénération. Si le travail du sol est nécessaire (au rouleau landais), il ne semble pas exclu de pouvoir porter le délai à 6 mois pour favoriser la stabilisation du substrat perturbé.

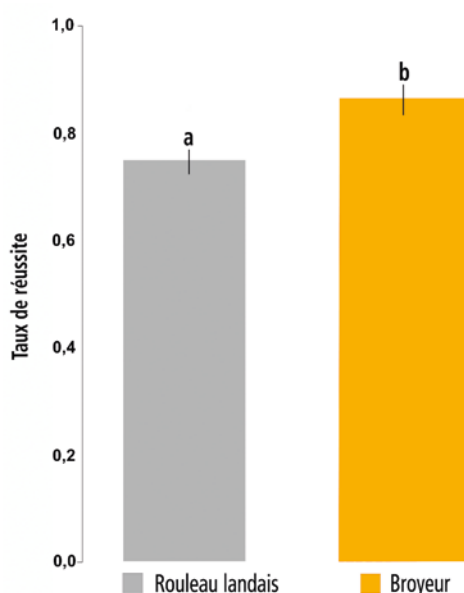


Figure 1. Taux de réussite de la régénération en fonction du type de travail préparatoire.

Rouleau landais = travail du sol en surface avec un outil assimilable au rouleau classique.

Broyeur = travail de destruction de la végétation avec un outil assimilable au gyrobroyeur.

L'effet de la coupe et des semis de sécurité

Les évolutions climatiques estivales, l'apparition de ravageurs émergents tels que la punaise américaine (*Leptoglossus occidentalis*) et la généralisation des exploitations mécanisées ont provoqué une forte diminution des récoltes de cônes et des rendements en graines. Face à cette très forte diminution des stocks, les gestionnaires ont limité depuis près de 10 ans les quantités de graines semées à 3 kg/ha. L'analyse des sommiers a permis d'apprécier l'impact de cette évolution technique sur la réussite des régénérations (Fig. 2).

Conformément aux craintes et au ressenti, la diminution quantitative des semis de sécurité a un impact sensible sur le niveau de réussite des régénérations. La proportion de régénérations acquises diminue en effet de 15 points : le taux de réussite est de 83 % pour les semis à 6 kg de graine à l'hectare alors qu'il est seulement de 68 % pour ceux à 3 kg/ha.

L'analyse des sommiers confirme que la période de réalisation idéale de la coupe, pour la bonne réussite des régénérations, se situe en janvier février. Le taux de réussite des régénérations, environ 85 %, est sensiblement meilleur que lorsque les coupes sont réalisées plus tôt (novembre – décembre) ou plus tard (mars à mai), périodes où les niveaux de succès sont de 65 à 75 %.

Logiquement, le constat est le même en ce qui concerne l'effet de la date des semis de et sécurité. Pour les semis de janvier février, les taux de succès sont compris entre 80 et 85 % alors qu'ils tombent à 65 – 75 % si le semis est plus précoce (novembre-décembre) ou surtout plus tardif (mars). Il est à noter cependant que les semis d'octobre pratiqués dans le sud des Landes donnent des résultats (taux de réussite de 83 %) similaires à ceux de la période hivernale la plus favorable. Le semis d'octobre suppose une potentielle germination avant l'hiver et donc, dans les meilleurs cas, des individus plus aptes à supporter le premier été.

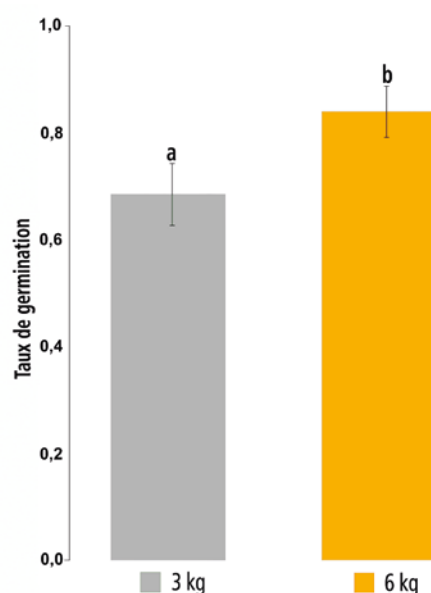


Figure 2. Taux de réussite de la régénération en fonction de l'intensité du semis de sécurité.

(Test d'indépendance des groupes à 3kg/ha et 6kg/ha depuis 2010).

L'analyse des sommiers confirme la nécessité d'ajustements sylvicoles

L'analyse des sommiers confirme donc que, au-delà des processus écologiques étudiés par INRAE (Guignabert *et al.*, ce numéro), les pratiques sylvicoles de renouvellement ont aussi leur part dans les difficultés de régénération observées. Dans ces conditions, il semble possible d'envisager certains ajustements qui pourront être repris dans l'actualisation en cours du « guide des sylvicultures des forêts littorales atlantiques dunaires ».

Adapter l'itinéraire de régénération au contexte

Ces ajustements peuvent être synthétisés sous forme d'itinéraires de la phase de régénération adaptés à différents contextes (Fig. 3).

Dans les zones sans difficultés particulières de régénération qui correspondent aux stations très oligotrophes (233 b et c à callune et lichen – J.M. Savoie – 1990), il est possible d'appliquer l'itinéraire classique (Fig. 3A) basé sur les choix techniques suivants : travail préparatoire au sens strict, seulement si nécessaire et exclusivement au broyeur, réalisation de la coupe et éventuellement du semis dans la période janvier-février.

Dans les contextes de difficultés de régénérations potentielles en présence d'une végétation dynamique (Fig. 3B), correspondant généralement aux stations les moins oligotrophes (232 et 233 a – J.M. Savoie – 1990), le travail sur la végétation est généralement nécessaire ; il doit être préférentiellement fait au broyeur en cas de ligneux abondants. Le travail préparatoire au rouleau landais doit, dans la mesure où l'état du terrain

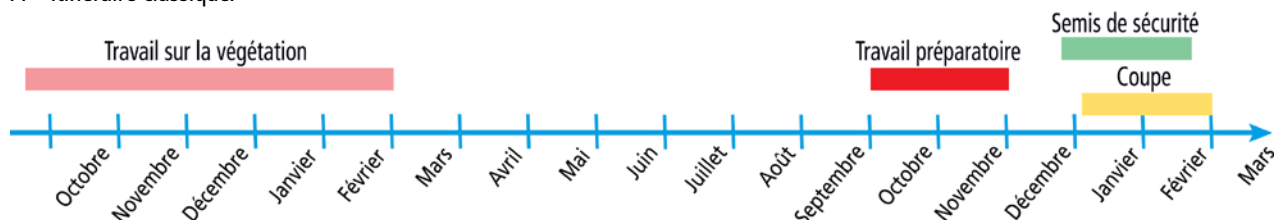
justifie une forte intensité (double passe croisée), intervenir un semestre avant le semis pour améliorer la réceptivité du sol. La coupe et le semis de sécurité sont réalisés de façon classique.

Dans les zones de difficultés potentielles de régénération et en conditions très xériques de plateaux dunaires ou hauts de pentes ouest, l'itinéraire précédent s'applique aussi mais en avançant le semis de sécurité en septembre-octobre (Fig. 3C). La germination précoce des graines avant l'hiver devrait assurer une meilleure résistance des plantules aux sécheresses estivales.

Développer le recours à la coupe d'ensemencement

L'autre ajustement important à développer concerne la pratique de la coupe d'ensemencement, dont les conclusions du projet ECODUNE confirment l'intérêt pour l'ensemble des forêts littorales aquitaines (Guignabert *et al.*, ce numéro). Si l'analyse des sommiers n'a pas permis d'explorer cet aspect, les travaux réalisés par C. Magnin sur les sites de suivi ECODUNE donnent des indications sur les caractéristiques optimales des peuplements d'ensemencement pour maximiser la réussite de la régénération, sous réserve de la qualité d'exécution de la coupe définitive, évidemment. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des peuplements dont la surface terrière est de 10 – 11 m², ce qui correspond à des densités comprises entre 50 et 120 tiges/ha selon le développement des arbres et la taille de leur houppier. L'objectif des coupes d'ensemencement doit être de conserver un taux de recouvrement du sol par les houppiers de l'ordre de 25 %, avec des houppiers d'une surface moyenne supérieure à 35 m². La coupe d'ensemencement n'est pas une technique recommandée en cas de houppiers trop étriés, dont la surface moyenne serait de 25 m² ou moins.

A – Itinéraire classique.



B – Adaptation pour les zones de difficulté potentielle à végétation très dynamique.



C – Adaptation pour les zones de difficulté potentielle, en conditions très xériques.



Figure 3. Les adaptations de l'itinéraire de régénération naturelle (par coupe rase ou par coupe d'ensemencement).

Adopter une politique de semis de sécurité efficiente et économe en graines

Enfin, il est nécessaire d'adapter le semis de sécurité aux besoins locaux réels. En raison des pénuries croissantes de graines, les quantités utilisées ont été uniformément limitées à 3 kg/ha. Or la nécessité du semis de sécurité n'est pas systématique. L'expérience montre en effet, que les peuplements se régénèrent encore très facilement dans la frange ouest des forêts (voir encadré) ainsi que dans les massifs situés au nord et sud du littoral aquitain. Par ailleurs les études menées sur les sites de suivi ECODUNE ont montré que le semis de sécurité n'est vraiment indispensable que dans les zones à problèmes de régénération reconnus. Ailleurs, le recours à la coupe d'ensemencement (pluie de graines prolongée) donne un résultat équivalent voire meilleur. Ces enseignements doivent nous inciter à construire une stratégie des semis de sécurité plus efficiente et économe en graines. Cela en abandonnant le semis de sécurité quand il n'est pas indispensable, et en l'utilisant au choix avec la coupe d'ensemencement dans des contextes normaux, pour pouvoir enfin augmenter les quantités de graines épandues dans les contextes à forts risques d'échec.

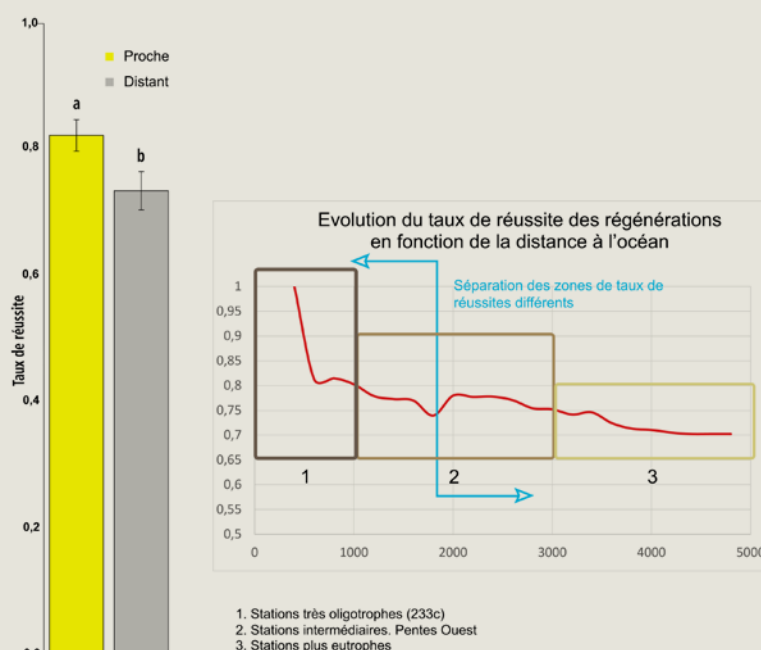
L'éloignement au littoral et les conditions édaphiques liées modulent les difficultés de régénération

Dans le cadre du travail sur les sommiers, la prise en compte de la distance des parcelles au trait de côte a permis de confirmer le ressenti de nombreux techniciens qui considèrent que les difficultés de régénération sont plus fréquentes et plus aigües dans la partie est des forêts dunaires.

La courbe de tendance de la réussite des régénérations en fonction de la distance à l'océan et l'histogramme de synthèse des taux de réussite en fonction de la classe de distance (en-deçà ou au-delà de 2 000 mètres) confirme que le niveau de réussite des régénérations diminue quand la distance au littoral augmente. En effet, à moins de 2 km de l'océan, le taux moyen de réussite est de 84 % alors qu'il est inférieur de 10 points au-delà de cette limite.

Cet éloignement à l'océan est lié à des changements de conditions édaphiques, eux-mêmes liés à l'ancienneté des dunes et aux dynamiques éoliennes. Selon le catalogue des types de stations forestières des dunes (J.M Savoie - 1990), il est possible de distinguer :

- les zones proches de l'océan occupant majoritairement des stations de type « très oligotrophe sur sol peu évolué et peu humifère » n° 233. Ces sols peu évolués sont caractérisés par l'absence ou une présence très limitée de l'horizon humifère ;
- les secteurs plus à l'est occupant des stations de type « oligotrophe sur sol peu évolué » n° 232, caractérisées par des sols plus évolués avec un horizon humifère d'importance croissante en allant vers l'est.



Références

Magnin C., 2018. Rapport d'étude pour la régénération des forêts du littoral atlantique Sud-Ouest. Résultats d'analyse des sommiers des forêts, introduction au raisonnement écologique, introduction à la réflexion sylvicole. Rapport apprenti ingénieur AgroParisTech. Bordeaux, Nancy : ONF, AgroParisTech. 21 p.

Sardin T., 2009. Guide des sylvicultures – Forêts littorales atlantiques dunaires. Paris : ONF. 175 p.

Savoie J.-M., 1990. Catalogue des types de station forestière des dunes littorales aquitaines et du Marenin. Bordeaux : ONF – Direction régionale Aquitaine. 209 p.

LA RÉGÉNÉRATION DU PIN MARITIME DANS LES FORÊTS DUNAIRES D'AQUITAINE : UN PROCESSUS COMPLEXE ET MULTIFACTORIEL

Arthur Guignabert⁽¹⁾, Maya Gonzalez⁽¹⁾, Florian Delerue⁽²⁾, Francis Maugard⁽³⁾, Laurent Augusto⁽¹⁾

(1) UMR 1391 ISPA, Bordeaux Sciences Agro, INRAe

(2) EA 4592 G&E, Bordeaux INP, Université Bordeaux Montaigne

(3) ONF, agence Landes Nord-Aquitaine, Mission littorale aquitaine

L'installation de nouveaux arbres est une étape clé pour la dynamique et la pérennité des écosystèmes forestiers. Dans les forêts de pins maritimes des dunes aquitaines, la régénération naturelle (après coupe rase) permet notamment de conserver la diversité génétique et le potentiel d'adaptation de ces forêts au changement climatique. Elle est aussi en adéquation avec la multifonctionnalité de la forêt dunaire qui répond aux objectifs de protection, d'accueil du public, de conservation de la biodiversité et de production. Depuis plus d'une vingtaine d'années, l'ONF observe cependant des difficultés importantes de régénération naturelle dans les forêts domaniales dunaires, et notamment dans la zone centrale du cordon aquitain (voir Maugard & Magnin (ce numéro) pour plus de détails sur le contexte et l'histoire).

Le processus de régénération fait intervenir différentes étapes du cycle de vie de l'arbre au cours desquelles plusieurs types d'interactions, à la fois biotiques et abiotiques, peuvent avoir un effet limitant sur chacune de ces étapes (Calama *et al.*, 2017). Les premières étapes pouvant être limitantes pour le renouvellement sont la production et la dispersion des graines, qui permettent un apport de graines au sol et qui dépendent des caractéristiques des arbres matures et des conditions météorologiques. Les étapes suivantes du cycle de régénération que sont la germination et la survie des plantules dépendent des conditions abiotiques (température, humidité, sol), mais aussi beaucoup des interactions biotiques entre espèces (compétition, facilitation, herbivorie, pathogènes). En particulier, la végétation spontanée qui se réinstalle après l'exploitation sylvicole peut avoir des effets contrastés sur les plantules. Pendant les périodes sèches, le recru arbustif peut faciliter la survie des jeunes pins en créant une « ambiance » de protection relative contre le stress hydrique ou le rayonnement solaire. Cependant, lorsque cette végétation est abondante, elle peut aussi exercer une compétition pour les ressources et même entraîner la mort des jeunes pins. D'autre part, une forte présence de grands herbivores pourrait augmenter la probabilité d'occurrence des échecs de recrutement des jeunes pins, tout comme la présence de pathogènes (e.g. l'armillaire) ou d'arthropodes (e.g. hylobe du pin). Enfin, les associations symbiotiques avec des champignons mycorhiziens, obligatoires pour toutes les espèces de conifères, sont très variables selon les contextes mais sont aussi très importantes pour la nutrition des jeunes pins et pour la réussite d'une régénération.

Les processus écologiques pouvant entraîner l'échec de l'installation du pin maritime sont donc nombreux, et interviennent à différentes étapes de la phase de renouvellement des peuplements. De plus, la régénération naturelle du pin maritime a été très peu étudiée en forêts dunaires d'Aquitaine. L'objectif de cette étude, menée dans le cadre du projet EcoDune lancé en 2015 par l'ONF avec INRAe et Bordeaux Sciences Agro, était donc d'identifier les processus écologiques responsables des échecs de régénération dans certaines forêts dunaires d'Aquitaine.

À l'aide à la fois d'études observationnelles et d'expérimentations in situ, nous avons plus précisément voulu :

- Quantifier la régénération à l'échelle régionale en étudiant toutes les étapes du cycle de régénération allant de la pluie de graines jusqu'à l'installation réussie d'une jeune pousse. La variabilité régionale a ainsi été précisée en interaction avec les pratiques sylvicoles.
- Identifier les facteurs limitants pour la régénération naturelle du pin maritime. En particulier nous nous sommes intéressés à l'étude des interactions biotiques (végétation voisine, herbivores, mycorhizes), elles-mêmes en interaction avec les effets du microclimat (notamment le stress hydrique lié à la sécheresse).

Nous avons donc mis en place des dispositifs spécialement conçus pour étudier ces problématiques et dont les résultats ont donné, malgré la complexité, des indications pratiques intéressantes.

Dispositifs d'étude

Un réseau de sites d'observation

Cinq sites d'observation ont été utilisés pour quantifier les différentes étapes du processus de régénération et caractériser la variabilité régionale en fonction des pratiques sylvicoles. Deux d'entre eux se situaient au sein de la zone principale d'échecs de régénération (Fig. 1 ; S3 et S4) et les trois autres dans des forêts domaniales considérées comme étant en réussite (Fig. 1 ; S1, S2 et S5). Dans la suite de l'article, ces sites seront numérotés de S1 à S5 selon le gradient nord-sud, avec un + (réussite) ou un - (échec) indiquant leur statut de régénération présumé. L'étude de l'itinéraire sylvicole a consisté à comparer deux facteurs croisés : le type de coupe et l'ajout ou non d'un « semis de sécurité ». Deux modalités de coupe ont été testées : la coupe rase, comme pratiquée ordinairement (Fig. 2a), ou la coupe d'ensemencement, testée comme itinéraire alternatif avec maintien de 70 arbres semenciers par hectare (Fig. 2b). Le « semis de sécurité » correspond à un ajout de graines issues de peuplements dunaires (5 graines m⁻²). L'itinéraire alternatif par coupe d'ensemencement permettrait d'assurer pendant plusieurs années la dispersion de graines et la possibilité d'apparition de nouvelles plantules afin de limiter l'impact d'une année climatique défavorable et, d'autre part, de diminuer le stress hydrique en cas de période sèche par le maintien d'un ombrage. Pour cela, chacun des deux types de coupe a été effectué par moitié sur l'ensemble des sites. Dix zones de suivis par type de coupe ont été réparties de manière systématique, chacune étant

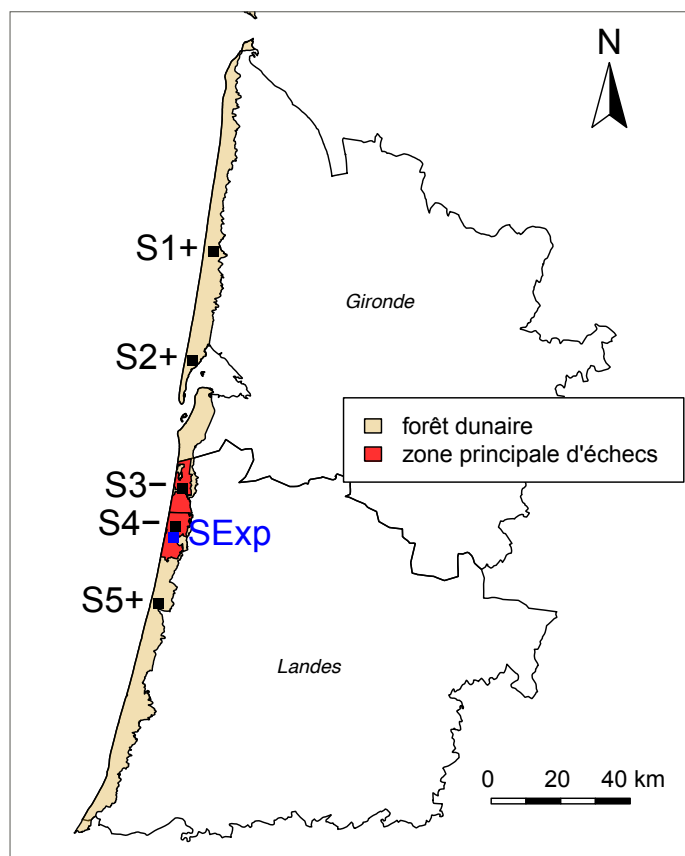


Figure 1. Localisation des différents sites d'étude.

composée de quatre quadrats de 4 m² : trois semés et un non semé. Chaque quadrat semé contenait vingt graines légèrement enfouies selon un patron précis, quantité qui correspond à la règle ONF de 3 kg ha⁻¹ pour les régénérations difficiles. Des pièges à graines ont été installés au niveau de chaque zone de suivi pour quantifier la pluie de graines. Les mesures de la pluie de graines, de la germination et de la survie des jeunes pins ont été effectuées durant trois ans afin de quantifier la régénération en lien avec ces pratiques.

Ces cinq sites ont également été utilisés comme base pour une étude concernant les ectomycorhizes associées aux jeunes pins et leur lien potentiel avec la régénération. Afin d'observer l'impact des deux types de coupes sur la composition et la quantité d'ectomycorhizes, nous avons utilisé comme témoin la parcelle forestière mature jouxtant chacun de nos sites. 90 plantules d'environ un an ont été prélevées sur chacun des cinq sites (30 en forêt mature, 30 en coupe d'ensemencement et 30 en coupe rase). La quantité de mycorhization et la composition en ectomycorhizes, basée sur quatre types fonctionnels (Agerer, 2001), ont été relevées sur chacune des plantules, ainsi que des mesures de morphologie aérienne, racinaire et de concentration en nutriments dans les aiguilles.

Deux sites expérimentaux

En plus du réseau de sites décrit ci-dessus, deux études ont été mises en place au sein de la zone à forts échecs (Fig. 1 ; SExp) pour comprendre les mécanismes écologiques en jeu lors de la phase de germination et d'installation (survie et croissance) des jeunes pins.

Une étude ayant pour but de caractériser le microsite favorable de germination a été réalisée au printemps 2017 au sein d'une coupe rase. L'hypothèse principale était que l'humidité joue un rôle très important pour la germination. Un placement contrôlé de 336 graines a été effectué en mars 2017 et l'émergence des plantules a été suivie toutes les quatre semaines jusqu'à début juillet, ce qui correspond à la période où se produit la quasi-totalité des germinations d'après le constat des années précédentes sur le réseau de sites d'observation. Nous avons déterminé la teneur en eau du sol à partir d'un échantillon de sol prélevé au niveau de chaque graine à la fin de l'expérimentation, et caractérisé plusieurs facteurs indirects pouvant moduler l'humidité disponible : la topographie, le microrelief, la végétation et la litière. La topographie dunaire est divisée en 3 niveaux : le bas de pente, le milieu de pente et le haut de pente, dont les écarts peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres et influencer la disponibilité en eau par la distance à la nappe phréatique. Le microrelief correspond au relief à l'échelle de la zone de la graine (zone de 10 x 10 cm au centre de laquelle la graine a été positionnée). Il a été caractérisé en mesurant l'altitude relative de cette zone, comparée ensuite à celle des 8 zones adjacentes en déterminant cinq classes de microrelief : creux, bas, plat, haut et sommet. Le « creux », position la plus basse, correspond à la position de rang 8 ou 8.5 (deux ex-aequo en dernière position) ou 9 ; le « bas » (rangs 6 à 7.5), le « plat » (rangs 4 à 5.5), le « haut » (rangs 2.5 à 3.5) et le « sommet » (rangs 1 à 2) répondent au même principe. Enfin, la végétation et la litière ont été caractérisées par une note selon leur recouvrement au sol, toujours à l'échelle de la zone de la graine (échelle pertinente pour la détection des facteurs impliqués dans le processus de germination).

La deuxième expérimentation visait à étudier l'effet des interactions entre plantes sur la survie et la croissance du pin entre 2015 et 2017. Ces interactions pourraient en effet modifier le stress hydrique et les attaques d'herbivores subis par les jeunes pins. Pour cela, nous avons fait lever des graines en conditions contrôlées puis transplanté ces jeunes pins sous les buissons d'arbousier, principal arbuste du sous-bois de ces forêts (Fig. 2c) ou à découvert (Fig. 2d), et dans des placeaux clôturés ou non. La clôture permet de contrôler la présence des herbivores tels que les ongulés et léporidés mais ne protège pas des petits rongeurs. Au total, 288 plantules ont été plantées en avril 2015 et 288 en avril 2016 puis elles ont été suivies (hauteur, survie, cause de mortalité) toutes les 4 semaines au printemps/été et toutes les 6-8 semaines en automne/hiver depuis la plantation jusqu'en avril 2017. L'humidité du sol et de l'air a été mesurée à l'aide de sondes, et des mesures de biomasses ont également été effectuées sur les pins de 2015 à la fin de l'étude.

Variabilité régionale de la régénération et relation avec les pratiques sylvicoles

Un effet fort mais bref du semis de sécurité

Le semis de sécurité n'a eu un impact positif sur la germination que pendant la première année de l'étude (2015), où le nombre de germinations était en moyenne 2.5 fois supérieur dans les quadrats semés comparé aux quadrats non semés (Guignabert *et al.*, 2020a). Cet effet positif du semis de sécurité la première année a été observé sur l'ensemble des 5 sites. Le semis de sécurité n'a ensuite eu aucun impact sur le nombre



Figure 2. Illustration des dispositifs d'étude : a) Coupe rase ; b) Coupe d'ensemencement ; c) Pin planté sous arbousier ; d) Pin planté seul sans arbousier. Pour le traitement sans arbousier, l'arbousier a été coupé à la base et les racines tranchées, afin d'obtenir un emplacement similaire en terme de conditions de sol à celui avec arbousier.

de germinations en 2016 et 2017, suggérant une faible durée de vie des graines dans le sol. Ce fort effet observé en 2015 peut s'expliquer par le fait que les graines semées ont une meilleure viabilité que celles issues de la pluie de graines, car les graines du semis de sécurité sont sélectionnées au préalable selon leur densité. L'effet important de ce semis, qui se fait en hiver alors que la pluie de graines a lieu en été, peut également venir du fait que la graine passe moins de temps dans le sol et est donc moins exposée à la prédation, aux pathogènes ou aux conditions climatiques défavorables.

La coupe d'ensemencement, un effet durable sur l'ensemble du cycle de régénération.

Le premier effet de la coupe d'ensemencement sur le cycle de régénération concerne la production et la dispersion des graines durant plusieurs années. Ainsi, nous avons observé que la pluie de graines était en moyenne de 11.1 graines m^{-2} an^{-1} (min : 6.1 pour le S5+, max : 24

pour le S2+), et qu'elle était influencée par la densité et le diamètre des semenciers (Guignabert *et al.*, 2020a). La quantité de graines atteignant le sol ainsi que leur morphologie se situent dans la gamme des valeurs connues pour les graines de pin maritime dans les forêts atlantiques et méditerranéennes (Calama *et al.*, 2017). Par ailleurs, les deux sites situés dans la zone à forts problèmes de régénération ne diffèrent pas des autres sur ce point. La quantité de graines dispersée ne semble donc pas être un facteur limitant pour la régénération dans notre contexte.

La coupe d'ensemencement a également eu un impact positif, tous sites confondus, sur le nombre de germinations durant les trois années de suivis. En regardant site par site, nous avons observé que l'effet positif des semenciers la première année n'est significatif que sur les sites en zone d'échec (S3-et S4-). Comme les germinations de la première année proviennent de la pluie de graines de l'année précédente, laquelle est identique dans les deux modes de coupes puisqu'elle a eu lieu avant l'exploitation, les différences observées sont a priori liées aux modifications des conditions locales liées à la coupe. Cela suggère des conditions

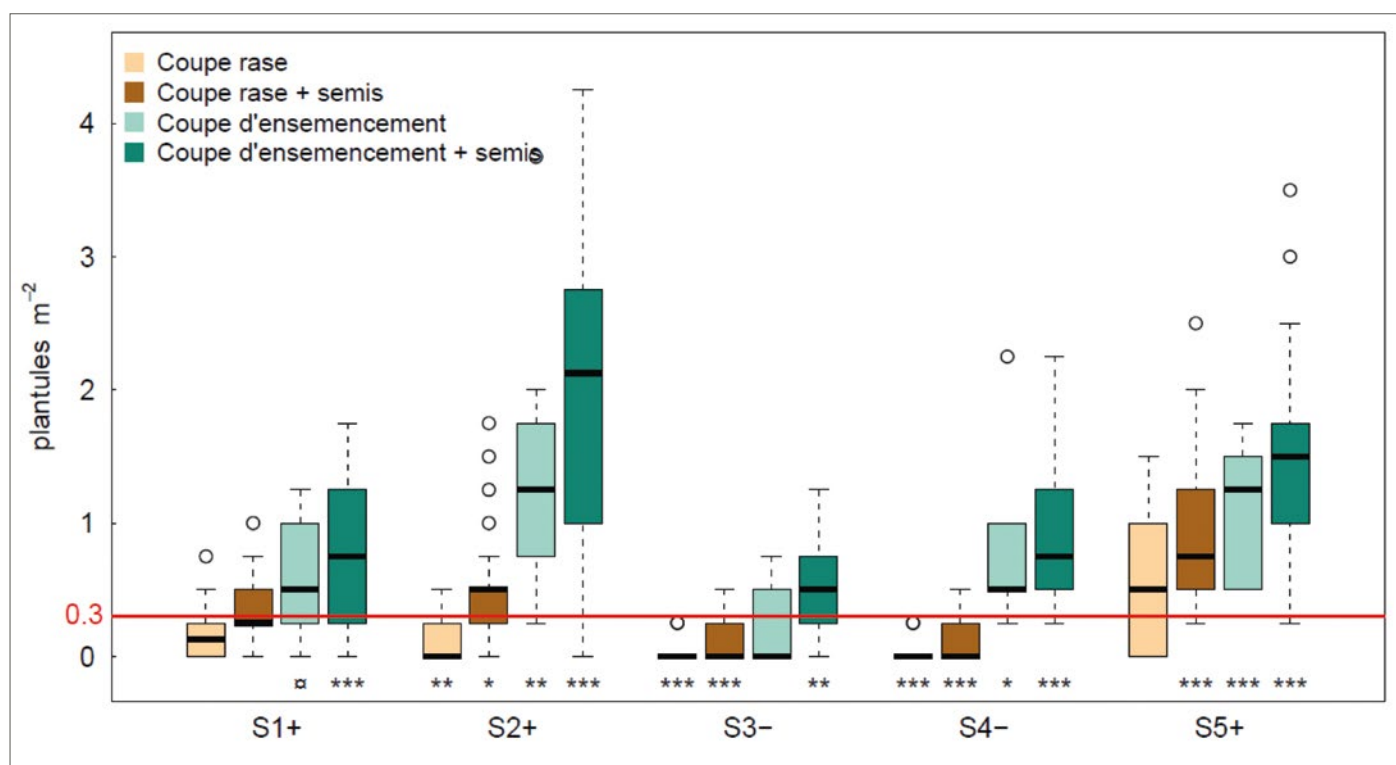


Figure 3. Densité de plantules trois ans après la mise en régénération de la parcelle selon les deux facteurs croisés du type de coupe et de l'ajout du semis de sécurité.

La ligne rouge représente le seuil de 0.3 semis m^{-2} indiquant une régénération réussie (=3000 semis ha^{-1} ; Sardin, 2009). Les astérisques indiquent une différence significative de la valeur seuil (***) $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; □ $p < 0.1$).

potentiellement plus stressantes dans cette partie centrale des forêts dunaires. Pour les deuxième et troisième années, l'effet positif de la coupe d'ensemencement a été observé sur les cinq sites et il est dû à l'apport supplémentaire de graines des semenciers (vs. aucune pluie de graines en coupe rase).

Pour finir, la coupe d'ensemencement a eu un impact positif sur la survie des plantules la première année après germination en diminuant la mortalité de 11 % par rapport à la coupe rase lors de l'année 2015 (la survie n'a pas pu être étudiée en 2016 et 2017 à cause du nombre insuffisant de germinations en coupe rase). Dans le détail, la coupe d'ensemencement a eu un effet positif sur trois des cinq sites, dont les deux de la zone d'échecs : réduction de la mortalité de 18 %, 22 % et 26 % pour S2+, S3- et S4- respectivement. De plus, S3- et S4- étaient les deux seuls sites où le taux de survie en coupe rase était inférieur à 50 %. L'effet des semenciers se traduit par une réduction significative du pourcentage de jeunes pousses mortes à cause de la sécheresse, suggérant ainsi une réduction du stress abiotique sous le couvert forestier, alors que le type de coupe n'a eu aucune influence sur la mortalité causée par les rongeurs ou ongulés. Cependant la pression d'herbivorie, évaluée par le taux d'abroustissement des jeunes pousses, a été plus élevée au sein de la zone d'échecs (+17 % de plantules abrousties), et elle a été plus faible en coupe d'ensemencement qu'en coupe rase au sein de cette zone critique (les sites S3- et S4- comptent respectivement 13 % et 23 % de plantules abrousties de plus en coupe rase qu'en coupe d'ensemencement).

Bilan des pratiques sylvicoles sur le succès de la régénération à l'échelle régionale

Trois ans après la mise en régénération, la densité de semis tous traitements confondus était la plus élevée sur les sites S2+ et S5+ et la plus faible sur les sites S3- et S4-, confirmant les différences de régénération selon les zones concernées (Fig. 3). La coupe d'ensemencement a eu un effet très significatif sur l'ensemble des sites tandis que le semis de sécurité a eu un effet positif sur l'ensemble des sites mais significatif seulement pour trois d'entre eux (S2+, S3- et S5+). L'interaction entre le site et le type de coupe était également très significative, montrant un impact important des conditions spécifiques à chaque site sur l'effet de la coupe d'ensemencement et in fine sur la réussite de la régénération. On notera également que ces deux pratiques avaient des effets indépendants, c'est-à-dire que l'effet du semis ne variait pas selon le type de coupe et inversement.

La coupe rase sans semis de sécurité n'a pas permis d'obtenir une densité de semis suffisante pour assurer la régénération, sauf pour le S5+ (Fig. 3). L'ajout du semis de sécurité a permis d'atteindre ou dépasser le seuil de régénération satisfaisante, soit 0.3 semis m^{-2} , pour les sites S1+, S2+ et S5+, mais pas dans les deux sites dans la zone d'échecs où la densité reste très insuffisante (Fig. 3). Cela confirme que l'itinéraire habituel (coupe rase + semis de sécurité) n'est pas adéquat pour le renouvellement des forêts dans cette zone.

La coupe d'ensemencement sans semis a eu un effet très positif, car elle a permis à quatre sites sur cinq d'avoir une régénération satisfaisante, le dernier (S3-) se situant à la limite du seuil prédéfini (Fig. 3). L'ajout d'un semis de sécurité a augmenté la densité de semis dans tous les sites, leur assurant ainsi une bonne régénération (Fig. 3). La coupe d'ensemencement, grâce à l'apport prolongé de graines et la modulation du microclimat sous son couvert, joue un rôle important sur plusieurs années, et semble être la pratique la mieux adaptée pour une régénération réussie sur l'ensemble de la forêt dunaire et singulièrement pour les zones à forts échecs.

Quels sont les facteurs écologiques limitant la régénération des forêts dunaires ?

L'humidité du sol et le microrelief influencent la germination

Les sols sableux de la forêt dunaire ont une très faible capacité de rétention d'eau et sont particulièrement pauvres en éléments nutritifs. De plus, la forêt dunaire est soumise à des périodes de stress hydrique marqué. Pour notre étude visant à caractériser le microsite favorable de germination, nous supposons donc que l'humidité du sol était le facteur primordial pour la germination. Nos résultats ont montré un effet significatif de l'humidité du sol avec une probabilité de germination plus élevée sur les microsites les plus humides, et confirment donc cette hypothèse. Le nombre de graines ayant germé durant cette expérimentation a été de 110 sur 336 (33 %), avec 70 % des germinations en avril et 27 % en mai, puis seulement 3 % en juin et 0 % en juillet malgré des précipitations conséquentes durant l'ensemble de la période d'étude. Cette concentration des germinations au printemps est également constatée sur le réseau de sites d'observations où l'on a compté entre 92 et 97 % de germinations avant mi-juin, suggérant un probable contrôle saisonnier de la germination par un facteur autre que l'humidité (comme la température ou la lumière par exemple).

Nous n'avons cependant observé que très peu d'effets des autres facteurs testés sur la germination. Nos résultats ont montré que les différences de probabilités de germination entre les classes de microrelief étaient directement liées à la teneur en eau du sol (Fig. 4), confirmant le rôle de l'humidité à l'échelle du microsite. La probabilité de germination est plus de quatre fois plus grande dans les « creux » que sur les « sommets » (Fig. 4a). Cette différence s'explique par la différence de teneur en eau dans le sol, supérieure dans les creux par rapport aux sommets (Fig. 4b). En effet, les creux sont des zones plus propices que les sommets pour retenir l'eau du fait de l'accumulation des eaux de ruissellement et d'une évaporation moins intense. La topographie dunaire (bas, milieu, haut de pente) n'a eu aucun effet sur le taux de germination malgré une humidité globalement plus élevée en bas de pente et plus faible en milieu de pente. Cela confirme que l'hétérogénéité de la topographie à fine échelle joue un rôle plus direct et plus important que les variations aux plus larges échelles.

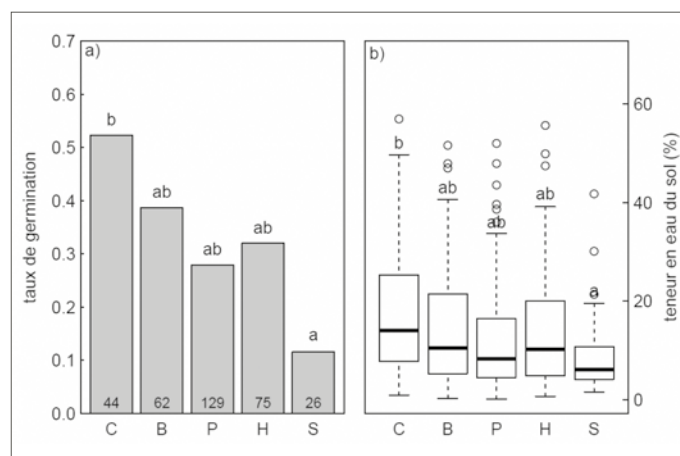


Figure 4. Relations entre microrelief et taux de germination des graines (a), et microrelief et teneur en eau du sol (b). Les lettres en abscisse correspondent aux 5 classes de microrelief : C = creux, B = bas, P = plat, H = haut et S = sommet. Ces cinq classes de microrelief correspondent à la position de la zone contenant la graine par rapport aux huit zones adjacentes en comparant leurs altitudes relatives (voir le texte, § « Deux sites expérimentaux »). Les nombres à la base de chaque barre correspondent aux effectifs pour chaque classe de microrelief. Les lettres minuscules indiquent des différences significatives entre sites.

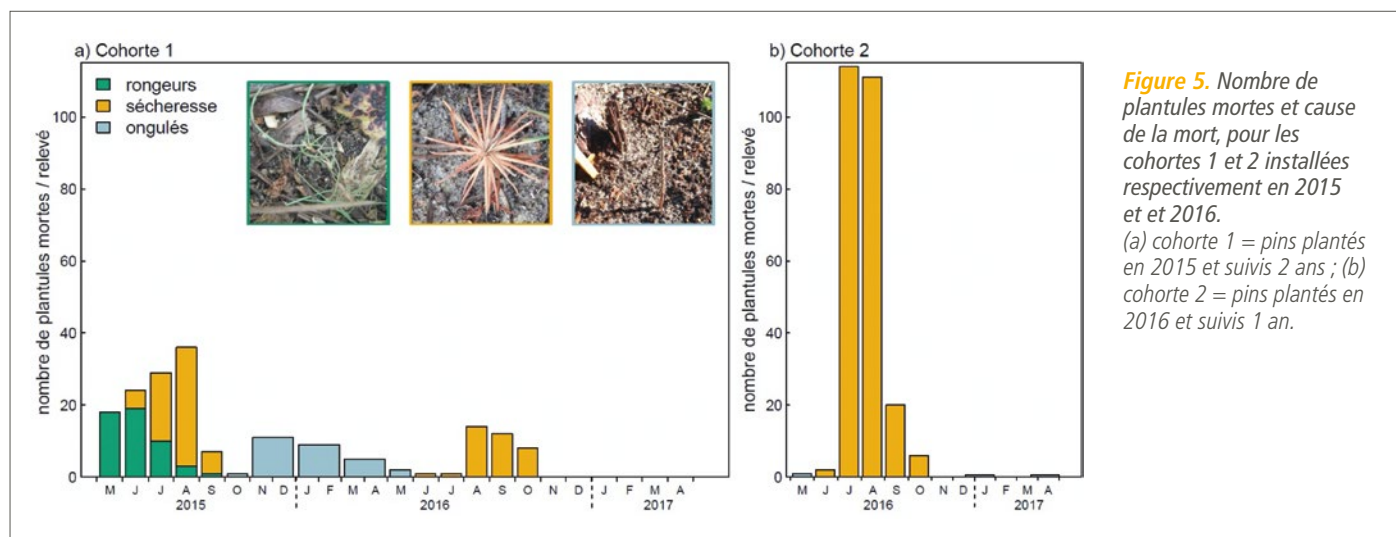


Figure 5. Nombre de plantules mortes et cause de la mort, pour les cohortes 1 et 2 installées respectivement en 2015 et 2016. (a) cohorte 1 = pins plantés en 2015 et suivis 2 ans ; (b) cohorte 2 = pins plantés en 2016 et suivis 1 an.

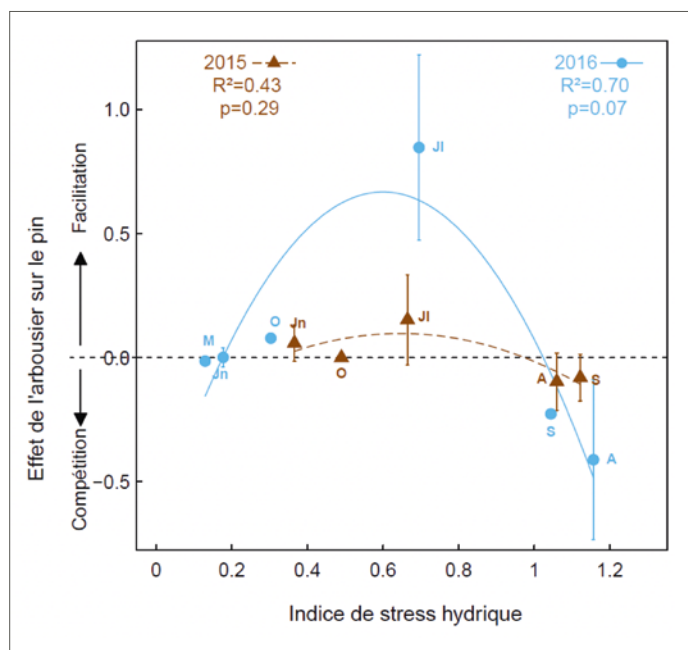


Figure 6. Effet de l'arbousier sur la survie du pin la première année en fonction du stress hydrique.

L'effet de la canopée arbustive sur la survie des plants a été calculé via un indice d'interaction (N_{int}) proposé par Díaz-Sierra et al. (2017). Cet indice varie entre -1 et 2 avec les valeurs positives indiquant une meilleure survie sous arbousier (facilitation) et les valeurs négatives une meilleure survie sans arbousier (compétition).

L'indice de stress hydrique a été calculé comme suit : déficit de pression de vapeur de l'air / teneur en eau du sol ; sa valeur augmente avec l'intensité du stress hydrique.

Les triangles et la courbe pointillée représentent la première cohorte (2015) ; les ronds et courbe pleine la deuxième cohorte (2016). Les mois de suivi sont indiqués par des lettres à côté de chaque point.

Une relation complexe entre le pin, l'arbousier et les herbivores concernant la survie et la croissance des plantules

La sécheresse estivale a été la principale cause de mortalité dans notre écosystème pour les deux années étudiées (Fig. 5). L'impact de la sécheresse a varié selon sa sévérité (estimée par la quantité de précipitations : 19 mm de pluie en juillet/août contre 106 mm en 2015), avec en conséquence une mortalité pouvant aller jusqu'à 90 % des plantules en 2016. Les mortalités imputables aux herbivores ont également été importantes sur le site d'étude, avec deux types d'herbivores agissant à deux périodes distinctes : les rongeurs au printemps/été, et les ongulés à l'automne/hiver (Fig. 5a).

Les interactions de facilitation entre plantes via une amélioration des conditions microclimatiques ont déjà été montrées comme essentielles dans ce type d'environnement où la sécheresse contraint l'installation des plantules (Padilla & Pugnaire, 2006). C'est en partie le cas dans notre étude, où l'arbousier a facilité la survie du pin au début de l'été en période de stress hydrique intermédiaire (juillet ; Fig. 6). Cette facilitation s'explique par une diminution du déficit de pression de vapeur d'eau (c'est-à-dire de la sécheresse de l'air) sous les arbustes plutôt que par une amélioration de l'humidité du sol (Guignabert et al., 2020b). Cette amélioration microclimatique est d'autant plus marquée que le volume de l'arbuste est grand (les arbousiers de 2016 étaient deux fois plus volumineux que ceux de 2015). Cependant, l'effet positif de l'arbousier sur le pin a tendance à disparaître voire même basculer vers la compétition lorsque la sécheresse perdure et que le stress hydrique est à son maximum (août/septembre ; Fig. 6). Sur l'ensemble de la saison estivale, il en résulte ainsi un effet globalement nul de l'arbousier sur la mortalité des plantules liée à la sécheresse.

La présence d'arbustes a également eu de forts effets indirects sur la survie des plantules via la modification des attaques d'herbivores. Ces effets indirects diffèrent selon le type d'herbivore considéré (Fig. 7). Nous avons observé une forte augmentation des taux de prédation par les rongeurs sous les arbousiers, avec une mortalité de 32 % sous les arbustes et seulement 4 % dans les zones sans arbousiers (Fig. 7a).

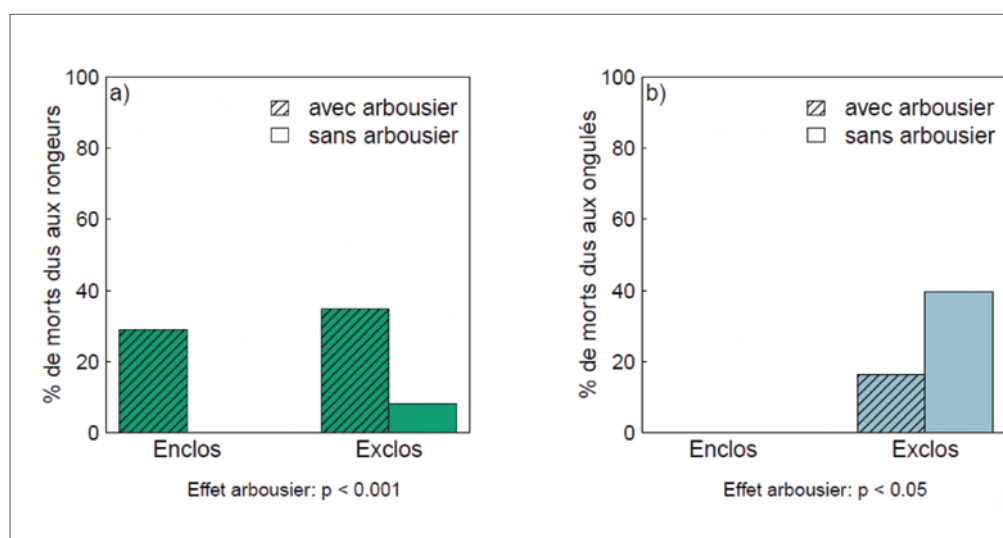


Figure 7. Mortalité des plantules due aux rongeurs (a) et aux ongulés (b) en présence ou en l'absence d'arbousier, dans les zones clôturées ou non. Enclos = exclusion des ongulés et léporidés ; Exclos (zone non clôturée) = tous types d'herbivores.

Ces résultats corroborent ceux de nombreuses études concernant l'impact des rongeurs sur la régénération ligneuse. Ces études montrent en effet que le pourcentage de couverture arbustive est le principal facteur déterminant l'abondance des micromammifères, en leur offrant un abri contre les prédateurs et un accès aux ressources alimentaires (Carrilho *et al.*, 2017). Inversement, les mortalités imputables aux ongulés ont été principalement observées dans les zones sans arbustes avec une mortalité de 40 % des plantules contre 16 % sous les arbustes (Fig. 7b), ce qui indique une facilitation indirecte des arbousiers. Ce phénomène a été démontré à plusieurs reprises, lorsque les plantules sont associées à des arbustes épineux, peu appétents ou denses. Comme l'arbousier est une espèce sans épines et abondamment consommée par les ongulés sur notre site, le mécanisme de facilitation observé ici est probablement dû à la dissimulation des plantules de pin sous le feuillage des arbustes, ce qui les rend plus difficiles à détecter par les ongulés.

Enfin, alors que les interactions avec l'arbousier concernant la survie sont complexes et variables dans le temps, nous avons observé un effet marqué sur la croissance : les pins sous arbousier sont plus petits (Fig. 8a), ont moins de biomasse (Fig. 8b) et sont plus élancés (Fig. 8c). Les arbousiers ont donc un effet négatif sur la croissance des plantules due à une forte compétition pour l'accès à la lumière, ce qui est cohérent avec le caractère héliophile du pin maritime. En effet, la photosynthèse plus active en pleine lumière induit une plus grande assimilation de carbone et donc une production de biomasse plus élevée qu'en zone ombragée. L'augmentation du ratio hauteur/diamètre sous arbousier peut être considérée comme étant une réponse d'évitement de l'ombre en favorisant d'abord la croissance en hauteur afin d'atteindre la lumière au détriment de la croissance en diamètre.

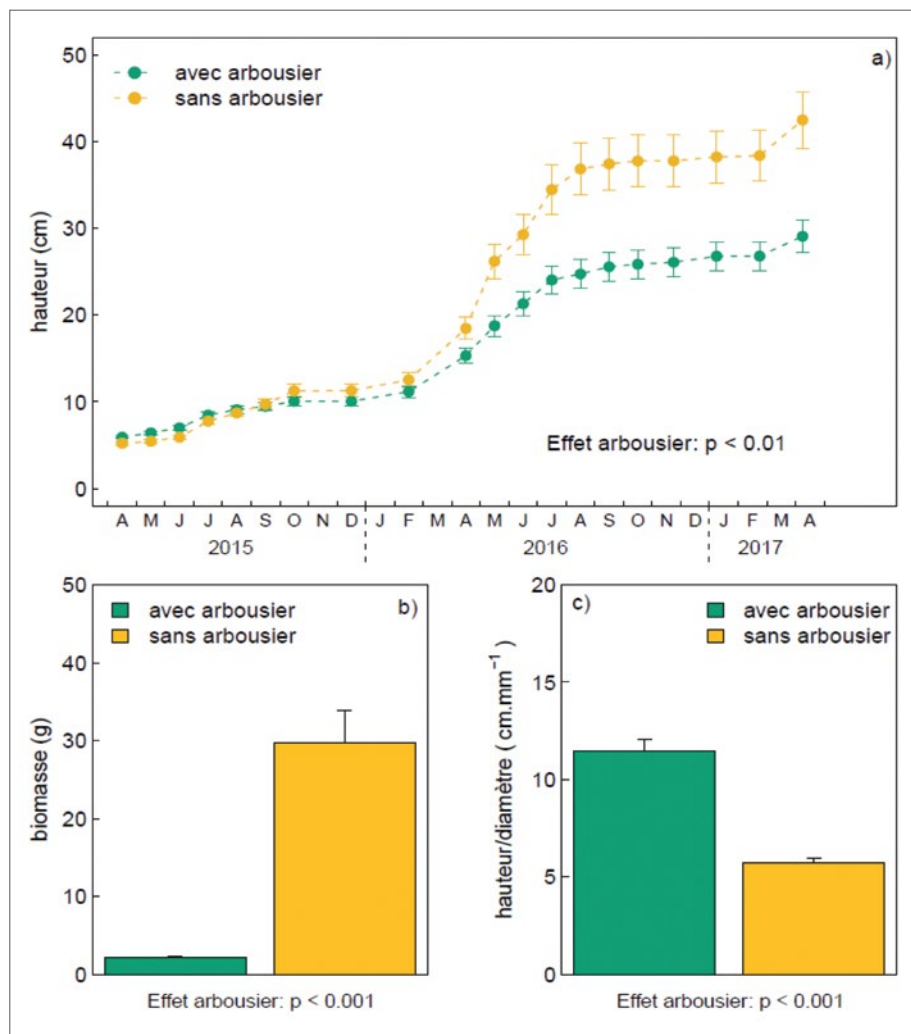


Figure 8. Hauteur (a), biomasse (b) et ratio hauteur/diamètre (c) des plantules selon la présence ou non d'arbousier.

Ces mesures représentent uniquement les données concernant les pins de la première cohorte encore vivants et non aboutis en avril 2017 ($n=33$ avec arbousier et $n=39$ sans arbousier). Les panels b) et c) correspondent aux valeurs mesurées après récolte des pins en avril 2017.



Arbousier, en sous-bois de la pinède.

Un rôle important des ectomycorhizes pour la nutrition mais sans lien avec les échecs de régénération

L'association symbiotique avec les ectomycorhizes est primordiale pour l'installation réussie d'un nouvel individu, et particulièrement dans les écosystèmes peu fertiles et secs, tels que les forêts dunaires. En effet, le champignon fournit à la plante de l'eau et des nutriments en échange de carbone, mais peut également augmenter la résistance des plantules à la sécheresse. Les résultats de notre étude préliminaire sur ce sujet ont confirmé que la mycorhization est essentielle pour la croissance des jeunes plantules dans les forêts dunaires : 97 % des apex racinaires étaient mycorhizés (c'est-à-dire entourés d'un manchon mycélien), et les quatre types fonctionnels de champignons étudiés étaient présents sur la majorité des systèmes racinaires. Trois de ces types fonctionnels étaient chacun associés spécifiquement à une concentration plus élevée d'un nutriment spécifique (N, Ca et K) dans les aiguilles, suggérant que différents types fonctionnels semblent être complémentaires pour l'accès à différentes sources de nutriments et stimuler ainsi la vitalité des plantules (Guignabert *et al.*, 2018). De plus, nous n'avons pas observé de différences liées aux ectomycorhizes entre coupe rase et coupe d'ensemencement, ce qui signifie qu'après la coupe rase il reste suffisamment d'inoculum disponible dans le sol pour l'établissement de nouveaux semis dans l'année qui suit. Cependant, bien que le facteur « mycorhize » soit essentiel à la régénération, il ne nous a pas permis de discriminer les sites de la zone d'échecs par rapport aux trois autres.



© Jean Favemec, ONF

Conclusions

Les résultats obtenus dans le cadre du projet EcoDune ont permis de faire avancer l'état des connaissances sur la régénération naturelle du pin maritime des forêts dunaires aquitaines. Les processus écologiques responsables des échecs observés dans certaines forêts sont maintenant mieux connus. Les résultats ont permis de confirmer la disparité intra régionale de la réussite de cette régénération naturelle, et de confirmer les zones préalablement pointées par l'ONF comme étant en échec.

Implication des résultats pour le cycle de régénération du pin maritime

Nos travaux confirment que la régénération naturelle est un processus complexe, influencé par de nombreux facteurs environnementaux et d'autres liés à la gestion, ces différents facteurs pouvant être en interaction. L'étude de la régénération d'une espèce et l'identification des facteurs potentiellement limitants reste donc compliquée, car son installation passe par le franchissement de plusieurs étapes successives pouvant chacune engendrer des échecs. Il est donc important d'étudier chaque processus car les sites favorables pour la survie des graines, puis l'émergence, puis la survie, peuvent être différents d'une étape à l'autre.

Dans notre contexte, la quantité de graines atteignant le sol ne semble pas être limitante. Les étapes suivantes semblent les plus problématiques et peuvent aboutir à des densités de plantules extrêmement faibles, avec la germination de 4 à 18 % seulement des graines issues de la pluie de graines et une mortalité des plantules pouvant atteindre 90 % le premier été.

La germination des graines, qui semble être une étape cruciale dans nos forêts, est fortement liée à l'humidité du sol et est influencée par l'hétérogénéité du microrelief. La cause majeure et récurrente de mortalité des plantules est la sécheresse estivale, bien que l'impact des herbivores soit également conséquent selon les années et les saisons. L'étude des interactions entre les plantules de pin et le sous-bois d'arbousier a permis de montrer les subtilités de ces interactions, qui sont à la fois directes et indirectes, positives et négatives. Il y a ainsi de la facilitation directe, via un effet de l'arbousier sur le microclimat qui améliore la survie des jeunes pins de façon transitoire en début d'été, mais également de la compétition lorsque la sécheresse perdure en fin d'été entraînant une augmentation de la mortalité des plantules. L'arbousier joue également un rôle indirect sur la survie des plantules en influençant la prédation par les herbivores, avec un effet protecteur contre les ongulés ou au contraire un effet attracteur vis-à-vis des rongeurs.

Deux facteurs responsables des échecs répétés

Concernant plus précisément la zone centrale de la forêt dunaire, où se concentrent les échecs de régénération, il n'est pas évident de mettre en avant un facteur prépondérant qui expliquerait lesdits échecs. Nos résultats indiquent au contraire que l'explication réside dans la conjonction de deux facteurs : une survie plus faible des plantules liée à la sécheresse estivale, et un taux d'abrouissement plus élevé.

La germination et la survie sont toutes deux améliorées par la coupe d'ensemencement uniquement sur les deux sites de la zone centrale, suggérant qu'un facteur local puisse être en jeu. La disponibilité en eau et la sécheresse étant les deux éléments principaux fortement impliqués respectivement dans la germination et la survie, cela suggère que ce facteur local impliqué dans les échecs de régénération pourrait être d'ordre climatique. Dans le contexte actuel de changement climatique, avec des sécheresses à venir de plus en plus fréquentes et intenses, ce résultat est important et confirme le besoin d'adapter les pratiques sylvicoles dans ce contexte global afin d'éviter une augmentation des échecs de régénération.

Le second paramètre qui discrimine la zone centrale du reste des forêts dunaires est le taux d'abroussissement, supérieur pour la zone en échec. Cette différence pourrait être due au fait que les forêts concernées sont incluses dans l'enceinte clôturée d'un vaste camp militaire où l'exercice de la chasse, aussi normal soit-il, reste subordonné aux priorités militaires (calendrier contraint, notamment).

Implications pour la gestion forestière

Les deux pratiques sylvicoles évaluées (coupe d'ensemencement et semis de sécurité) ont eu un effet significatif en améliorant la régénération dans tous les peuplements. Cependant, les effets sur chacune des étapes (germination des graines, survie des plantules) ont montré des différences entre sites, suggérant l'importance des facteurs locaux sur l'ensemble de la réussite du processus de régénération.

La coupe rase n'a permis d'atteindre (à peine) le seuil de régénération satisfaisante que sur un seul site, les 4 autres ayant une densité de plantules largement insuffisante. On peut donc considérer que ce mode habituel de régénération devrait être évité, et ce même avec l'ajout d'un semis de sécurité, car il n'a qu'un effet temporaire. Ainsi, si la coupe rase suit une mauvaise année de production de semences, ou si la saison de végétation après la coupe rase est très sèche, la régénération ne sera pas suffisante ce qui conduira la parcelle à une impasse sylvicole. En revanche, la coupe d'ensemencement a eu un fort impact positif sur tous les sites dès la première année par création d'un microclimat plus favorable sous la canopée des arbres, et plus encore dans les années suivantes via l'apport supplémentaire de graines. Cette méthode devrait donc être privilégiée sur l'ensemble des forêts dunaires, en veillant au maintien d'un couvert forestier suffisant pour favoriser la régénération (Guignabert *et al.*, 2020a). Un semis de sécurité pourrait y être ajouté pour maximiser les chances de succès, mais prioritairement dans les zones où la régénération naturelle est faible.

À partir de nos observations sur les mécanismes écologiques et les interactions pin-arbousier-herbivores, nous pouvons également recommander deux actions complémentaires pour sécuriser cette régénération naturelle : i) contrôler la végétation spontanée au moment de l'exploitation, puis une nouvelle fois deux à trois ans après la coupe par dégagement manuel (pour ne pas détruire les semis déjà présents) afin de favoriser la croissance des plantules de pin ; ii) augmenter les plans de chasse (et s'assurer de leur exécution effective) au sein de la zone en échec afin de restaurer un équilibre forêt/ongulés compatible avec le renouvellement des peuplements.

Remerciements

Ces travaux ont en partie été réalisés dans le cadre de la thèse d'Arthur Guignabert financée par la région Nouvelle-Aquitaine et Bordeaux Sciences Agro. Les auteurs remercient vivement Didier Canteloup pour son engagement et sans qui ce projet n'aurait pas été possible : Didier a été l'initiateur de ce projet en identifiant cette problématique locale et en rassemblant tous les partenaires afin d'étudier cette question majeure pour les forêts régionales. Les auteurs remercient également l'ensemble des agents ONF travaillant au sein des unités territoriales de nos sites d'étude (Biscarrosse, Lège-Cap-Ferret, Lacanau, Sainte-Eulalie-en-Born, Saint-Julien-en-Born) pour leur aide précieuse lors des mesures sur le terrain. Les auteurs remercient enfin tous ceux qui se sont impliqués au sein de ce projet : merci à Mark Bakker, Céline Birolleau, Christophe Chipeaux, Nathalie Gallegos, Céline Gire, Cathy Lambrot, Sylvie Niollet et Loïc Prud'Homme.

Références

- Agerer R., 2001. Exploration types of ectomycorrhizae. *Mycorrhiza* vol. 11(2), pp. 107–114. <https://doi.org/10.1007/s005720100108>
- Calama R., Manso R., Lucas-Borja M.E., Espelta J.M., Piqué M., Bravo F., Del Peso C., Pardos M., 2017. Natural regeneration in Iberian pines: A review of dynamic processes and proposals for management. *Forest Systems* vol. 26(2), 20 p. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11255>
- Carrilho M., Teixeira D., Santos-Reis M., Rosalino L.M., 2017. Small mammal abundance in Mediterranean Eucalyptus plantations: how shrub cover can really make a difference. *Forest Ecology and Management* vol. 391, pp. 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.032>
- Díaz-Sierra R., Verwijmeren M., Rietkerk M., de Dios V.R., Baudena M., 2017. A new family of standardized and symmetric indices for measuring the intensity and importance of plant neighbour effects. *Methods in Ecology and Evolution* vol. 8, pp. 580–591. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12706>
- Guignabert A., Augusto L., Delerue F., Maugard F., Gire C., Magnin C., Niollet S., Gonzalez M., 2020a. Combining partial cutting and direct seeding to overcome regeneration failures in dune forests. *Forest Ecology and Management* vol. 476, 118466. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118466>
- Guignabert A., Augusto L., Gonzalez M., Chipeaux C., Delerue F., 2020b. Complex biotic interactions mediated by shrubs: Revisiting the stress-gradient hypothesis and consequences for tree seedling survival. *Journal of Applied Ecology* vol. 57(7), pp. 1341–1350. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13641>
- Guignabert A., Delerue F., Gonzalez M., Augusto L., Bakker M., 2018. Effects of Management Practices and Topography on Ectomycorrhizal Fungi of Maritime Pine during Seedling Recruitment. *Forests* vol. 9(5), 245. <https://doi.org/10.3390/f9050245>
- Padilla F.M., Pugnaire F.I., 2006. The role of nurse plants in restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* vol. 4(4), pp. 196–202. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004)
- Sardin T., 2009. Guide des sylvicultures Forêts littorales atlantiques dunaires. Office National des Forêts, Paris.

■ Prochain numéro :

Nous reviendrons sur la crise du scolyte de l'épicéa qui sévit depuis 2018 et sur la façon dont elle a été (et est encore) gérée en forêt publique.

■ Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

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

Sur internet : <http://www.onf.fr/> (en pied de page : Ressources/Publications)

Accès à l'ensemble de la collection :

> via la notice d'un numéro quelconque ((Détails/collection)

> accès direct : <https://www.onf.fr/onf/ressources---special-rendez-vous-techniques>

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

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



Si vous désirez nous soumettre des articles

prenez contact avec :

ONF - Département recherche, développement et innovation

Christine Micheneau



onf.fr     