



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Office National des Forêts

#81

RenDez-Vous techniques

DOSSIER :
La protection des sols forestiers

Printemps 2025

EDITORIAL

03 Protéger les sols forestiers : un enjeu essentiel pour la gestion durable des forêts

Par François Bonnet

DOSSIER : Protection des sols forestiers

04 Les cloisonnements, mode d'emploi

Par Noémie Pousse, Diane Behr, Sarah Garcia, Armelle Noé, Médéric Aubry et Didier Pischedda

15 Les impacts écologiques et économiques du tassement des sols

Par Noémie Pousse, Frédéric Darboux et Arnaud Legout

18 Outils d'aide à la décision pour la gestion durable des sols

Par Noémie Pousse, Diane Behr, Sarah Garcia et Armelle Noé

21 Le service climatique de praticabilité des cloisonnements : un outil en cours de développement pour mieux programmer les exploitations en fonction des prévisions météorologiques

Par Noémie Pousse, Nicolas Beudez, André Chanzy et Stéphane Ruy

25 Préserver les sols forestiers de l'érosion

Par Frédéric Darboux, Noémie Pousse et Arnaud Legout

28 Stratégie de développement du câble aérien à l'ONF

Par Didier Pischedda, Charline Henry et Noémie Pousse

33 Définition de la fertilité chimique des écosystèmes forestiers et rôle de la gestion dans sa préservation

Par Arnaud Legout, Gregory van der Heijden et Noémie Pousse

37 Comment évaluer la fertilité chimique en forêt ?

Par Arnaud Legout, Gregory van der Heijden et Noémie Pousse

41 Effets du prélèvement des menus-bois sur la biodiversité et la fertilité des sols

Par Emila Akroume

46 Quel est l'impact des plantations de Douglas sur les sols forestiers ?

Par Arnaud Legout, Arnaud Reichard, Gilles Nourrisson, Jérôme Demaison, Alexia Paul, Bernd Zeller, Gregory Van Der Heijden, Charline Henry, Pascal Bonnaud et Jacques Ranger

50 Le carbone dans les sols forestiers

Par Emila Akroume

ARTICLES HORS DOSSIER

55 Situation sanitaire de la chênaie caducifoliée face aux risques biotiques et au changement climatique

Par Claude Husson et François-Xavier Saintonge

61 Le fonctionnement hydrique des arbres sous sécheresses caniculaires

Par Théo Javoy, Philippe Balandier, Hervé Cochar, Sandrine Perret et Thomas Perot

65 Le drone : une nouvelle technologie qui intègre progressivement la boîte à outils du forestier

Par Jérôme Bock et Fabrice Coq

71 Lutte contre les espèces exotiques envahissantes dans la Réserve biologique intégrale des Hauts de Bois de Nèfles sur l'île de La Réunion

Par Julien Triolo, Camille Vincendeau, Charline Henry, Léa Marie, Elia Barnier, Coline Dehlinger, Marine Fabiani et Mathias Yeve

Protéger les sols forestiers : un enjeu essentiel pour la gestion durable des forêts

Les sols forestiers sont une ressource fragile qui rend de multiples services écosystémiques. Support de croissance des arbres, ils sont aussi un réservoir souvent méconnu de biodiversité. Ils interviennent dans le cycle de l'eau, stockent du carbone et contribuent au bon fonctionnement général de l'écosystème forestier, donc à la productivité forestière.

La préservation des sols forestiers est essentielle pour garantir une production durable de bois, pour soutenir l'atténuation des effets du changement climatique, préserver la biodiversité, ainsi que pour favoriser l'adaptation et la résilience des écosystèmes forestiers dans le contexte du changement climatique.

Pourtant, ces sols, façonnés par des processus naturels lents et complexes, peuvent être altérés par des perturbations, notamment celles induites par certaines activités mécanisées de gestion forestière.

L'Office national des forêts a depuis longtemps intégré cette problématique dans ses pratiques de gestion. L'implantation des cloisonnements d'exploitation pérennes, la limitation de l'export des rémanents ou encore le débardage par câble-mât sont autant de leviers qui permettent de concilier production de bois et préservation des sols.

Ce dossier propose un état des lieux des connaissances et des outils disponibles pour gérer durablement les sols forestiers. Il met en lumière les impacts du tassement des sols et de l'export des rémanents, détaille les bonnes pratiques de mise en place et de pérennisation des cloisonnements. Il présente aussi des solutions innovantes, comme les outils de diagnostic de sensibilité des sols ou les modèles prédictifs de praticabilité des cloisonnements en fonction des prévisions météorologiques.

À travers ces articles, l'objectif est clair : donner aux gestionnaires forestiers des clés pour prendre des décisions éclairées et garantir le bon fonctionnement des sols, et donc la pérennité des forêts

François Bonnet
Directeur général adjoint de l'ONF

Les cloisonnements, mode d'emploi

Voici l'article phare de notre dossier sur la protection des sols forestiers. Il répond aux questions pratiques que se posent régulièrement les forestiers depuis la généralisation de la mise en place des cloisonnements d'exploitation pour concentrer la circulation des engins sur des voies dédiées. Comment pérenniser le réseau de cloisonnements ? Comment imposer la circulation sur ce réseau ? Un cloisonnement peut-il être remis en état ? Comment convaincre les propriétaires et les gestionnaires de leur utilité ?

La circulation des machines impacte de manière immédiate, durable et intense le fonctionnement des sols et des peuplements forestiers. Dès les premiers passages, le sol est plus ou moins imperméabilisé, entraînant, entre autres, un dysfonctionnement des racines (asphyxie, forte résistance à la prospection) et une modification des transferts d'eau dans le sol. Les racines prospectant difficilement et l'eau s'infiltrant moins en profondeur, la résistance des peuplements en climat changeant diminue. Le dysfonctionnement des sols à la suite d'une circulation d'engins est durable, au moins plusieurs décennies, et varie en fonction du climat et de l'intensité de l'impact.

Des chantiers suivis ont montré que l'augmentation du poids des engins implique une augmentation des charges à la roue (poids de chaque 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. Ainsi, plus l'engin est lourd, plus les impacts seront profonds et donc durables (encadré 1).

Concentrer tous les passages des machines sur des voies de circulation permanentes, nommées cloisonnements, traînes, chemins..., est donc essentiel pour préserver le reste de la parcelle. Cependant, cette mesure soulève de nombreuses questions.

Comment pérenniser le réseau de cloisonnements ?

Pour pérenniser le réseau de cloisonnements², la première étape est de le réfléchir en fonction de l'ensemble des contraintes **pour qu'il soit plus simple de circuler sur les cloisonnements que sur le reste de la parcelle.**

Il faut donc :

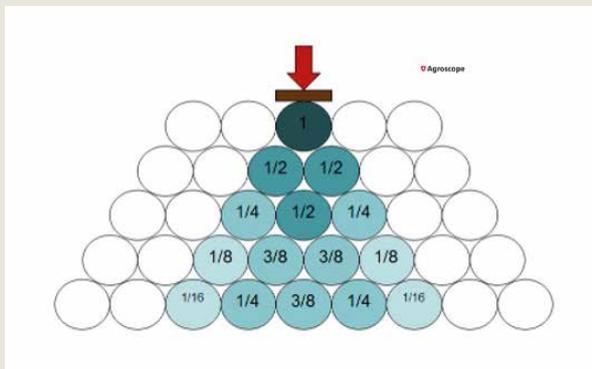
- réutiliser les voies et traces de circulation préexistantes ;
- prendre en considération la position des places de dépôts ;
- s'adapter au relief et à la présence d'affleurements rocheux ou de rochers ;
- éviter d'installer des cloisonnements traversant des cours d'eau temporaires ou permanents, des zones humides, des mares, des fossés... Prévoir des lignes de reprise ou tournières permettant le contournement des zones restant humides même lors des périodes sèches ;
- prendre en considération la portée des engins : les entraxes supérieurs à 21 m sont à éviter, car ils ne permettent pas une mécanisation complète de la parcelle et augmentent ainsi le risque de divagation hors des cloisonnements, sauf si on utilise des moyens pour les éviter (dérouler le câble ou utiliser la traction animale pour les bois hors d'atteinte des engins depuis les cloisonnements, abattage manuel directionnel dans la bande boisée centrale, abandon des bois de la bande centrale) ;
- prendre en considération la sensibilité des cloisonnements à une dégradation de leur praticabilité : éviter d'installer des cloisonnements à cheval sur deux zones de sensibilité distincte, sinon les restrictions de circulation correspondront à celles de la portion de sensibilité plus forte.

Il est nécessaire d'implanter des voies de circulation les plus linéaires et systématiques possible, sinon cela implique de bien signaler les changements de direction ou les changements d'entraxe sur le terrain pour éviter que l'opérateur ne perde le cheminement.

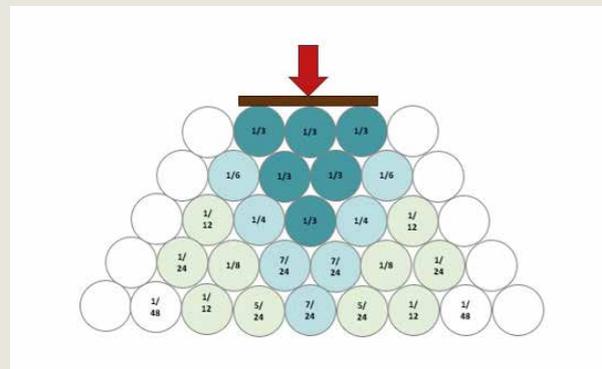
Si quelques arbres d'avenir se trouvent sur les cheminement à créer, les maintenir augmente le risque de passage de part et d'autre des arbres, ce qui occasionne une augmentation de la surface circulée et, à terme, le dépérissement des arbres concernés. Il vaut donc mieux les couper en amont.

Encadré 1 : Deux mesures pour réduire la pression exercée sur le sol¹

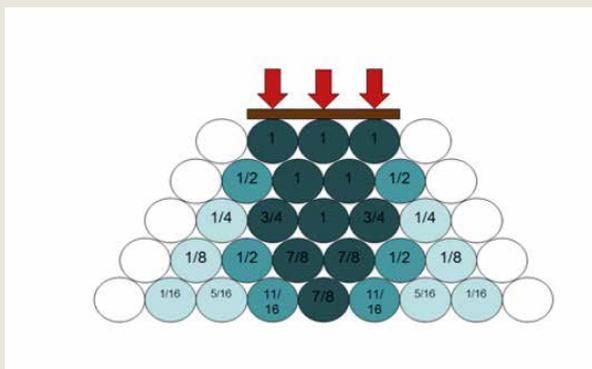
La charge à la roue est représentée par une flèche rouge dans les graphiques suivants, la taille des pneumatiques est représentée par le rectangle marron à la surface du sol (plus le pneumatique est large plus la surface de contact avec le sol augmente et plus la pression diminue). Le sol est représenté par des billes qui se touchent. Ce modèle fait l'hypothèse que la pression ressentie par chaque particule de sol (1 bille) est répartie de manière égale entre les deux particules de sol sous-jacentes. Cette hypothèse est vérifiée dans de nombreuses situations et permet de simplifier et rendre accessible les équations de distribution des pressions dans le sol.



La charge à la roue est faible et la surface de contact aussi. On a une pression de 1 sur la particule de sol située sous la roue. La 5^e particule de sol en descendant dans le sol subit une pression de $3/8^e$, soit 37,5 % de la pression initiale.



La charge à la roue est restée la même, mais la surface de contact a triplé. La pression subie par les premières particules de sol n'est plus que de $1/3$, car cette fois-ci 3 particules de sol la subissent. La 5^e particule de sol en descendant dans le sol subit une pression de $7/24^e$, soit 29 % de la pression initiale. Augmenter la surface de contact, à masse constante, permet de diminuer la pression.



Dans ce scénario, on triple la charge à la roue. La pression subie par les premières particules de sol est toujours de 1, mais cette fois-ci, trois particules de sol la subissent. La 5^e particule de sol en descendant dans le sol subit une pression de $7/8^e$, soit 87,5 % de la pression initiale.

Conclusions :

1) pour diminuer la contrainte exercée sur le sol, à masse constante, on peut opter pour des pneumatiques plus larges et/ou des roues plus grandes ou la pose de tracks, ceci afin d'augmenter la surface de contact au sol et ainsi réduire la pression par unité de surface.

2) pour réduire la pression exercée sur le sol, il faut surtout **réduire la charge à la roue**. En effet, plus elle est élevée, plus les contraintes exercées par les engins atteignent les couches profondes du sol.

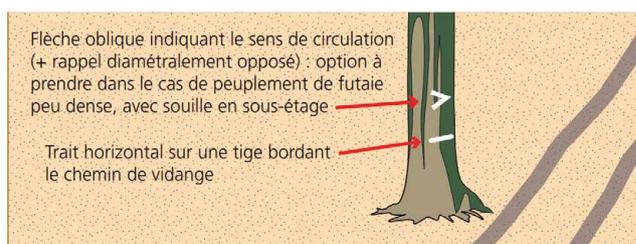
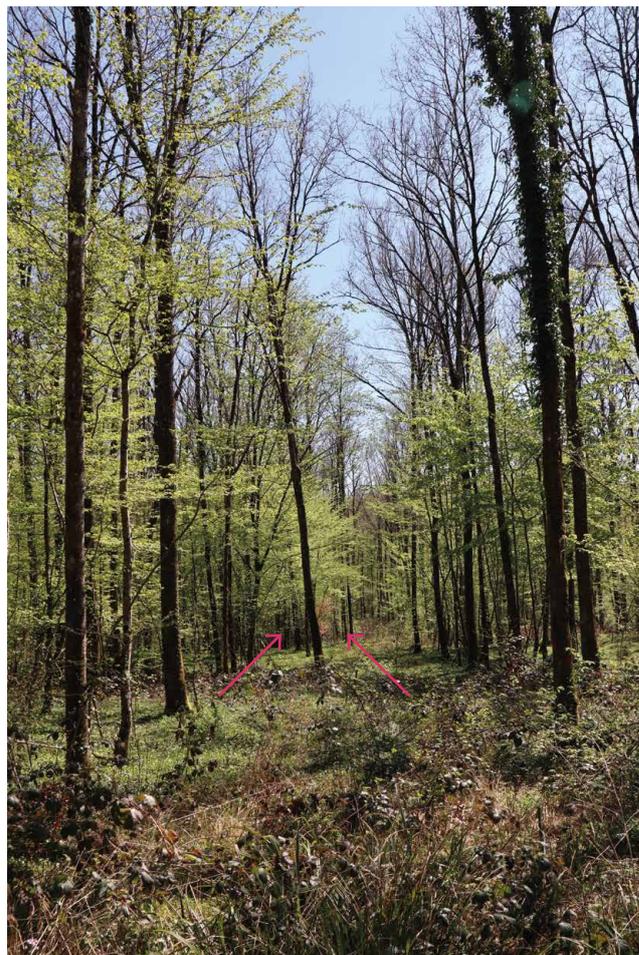


↑ **Figure 1.** Maintien d'un arbre d'avenir trop proche du cloisonnement, passage des engins de part et d'autre de l'arbre. Photo : Guillaume Galet

Si des souches de taille importante se trouvent sur les cloisonnements à ouvrir, les contourner peut rendre le cheminement difficile à suivre, à moins de multiplier les marques au niveau de chaque souche. Il est ainsi plus simple de broyer ces souches en gardant un cloisonnement le plus linéaire possible.

Le marquage des cloisonnements sur le terrain et sur des plans est également indissociable de la pérennisation du réseau. Cela peut se faire de plusieurs manières selon le contexte.

Quand les arbres de bord de cloisonnements sont encore présents, la situation idéale est un marquage pérenne du début de chaque cloisonnement avec une numérotation sur le terrain qui correspond aux numéros indiqués sur le plan donné à l'opérateur. Un marquage le long du cloisonnement est indispensable à l'opérateur pour suivre le cheminement, surtout dans le cas de cloisonnements non rectilignes. Il doit être fait avec une marque identique sur tout le territoire, pour éviter aux opérateurs de se tromper : des chevrons indiquant le sens de passage.



↑ **Figure 2.** Marquage des cloisonnements. Guide PROSOL³.

Quand les arbres ne sont plus présents par suite d'une coupe de régénération ou une coupe sanitaire, il est important d'éviter de planter dans les anciens cloisonnements qui ne sont pas propices à la croissance des plants. Maintenir le repérage des anciens cloisonnements est également essentiel pour ne pas créer de nouveaux cloisonnements décalés par rapport aux précédents. Dans les cas où les arbres ont une faible valeur commerciale, on peut repérer les anciens cloisonnements en coupant à plus d'un mètre de hauteur les arbres en bordure de ces derniers. Attention, ceci est uniquement réalisable à l'abatteuse et

interdit en bûcheronnage manuel pour des raisons de sécurité. Une alternative consiste à mettre des piquets au début des cloisonnements, et régulièrement le long de ceux-ci.

Dans tous les cas, un relevé des cloisonnements via un GPS précis (type antenne RTK) permet l'archivage de l'information et le dialogue avec les différents acteurs du processus d'exploitation des bois.

Lors des chantiers de plantations, certaines agences travaux valorisent les cloisonnements préexistants à partir d'une photo de la parcelle prise par un drone. Le nouveau réseau de cloisonnements, qui s'appuie au mieux sur l'ancien réseau, est ensuite géoréférencé et les données peuvent être intégrées dans un GPS qui, placé sur le tracteur, permet de guider le chauffeur pour le broyage de la végétation sur les cloisonnements. Ces nouvelles techniques en cours de test ne dispensent toutefois pas de la phase de reconnaissance ni du marquage à la peinture des cloisonnements d'exploitation pour permettre aux entreprises de travaux de se repérer.

Enfin, pour que le réseau de cloisonnements soit pérenne il doit rester praticable sur le long terme. Dès que les ornières dépassent 10 cm de profondeur, l'eau s'infiltrera plus difficilement dans le sol et les cloisonnements restent saturés en eau et donc impraticables plus longtemps et plus régulièrement au cours de l'année. Pour éviter l'orniérage et préserver la praticabilité des cloisonnements, la circulation doit avoir lieu sur sol portant (diagnostic de sensibilité réelle au démarrage du chantier, cf. For-Eval ou guide PROSOL). Attention également au nombre de passages si les conditions de portance ne sont pas optimales. En effet, le nombre de passages augmente peu la profondeur d'ornière quand le sol est sec, mais quand le sol est humide, le nombre de passages peut augmenter le risque d'orniérage pour les engins les plus lourds (charge à la roue > 4 tonnes).

Le diagnostic de sensibilité potentielle à une dégradation de la praticabilité des cloisonnements (For-Eval ou Webcarto) permet d'organiser les chantiers en fonction du climat. Par exemple, en période sèche, on commence par les parcelles les plus sensibles puis, s'il pleut, on travaille sur les parcelles les moins sensibles où les cloisonnements restent praticables. Si la prévention n'a pas fonctionné, il est essentiel de stopper le chantier dès l'apparition des premières ornières atteignant 20 cm sur les cloisonnements classiques ou 30 cm sur les collecteurs ou cloisonnements principaux⁴. En effet, il existe toujours une variabilité spatiale de la portance des cloisonnements difficile à identifier a priori. S'arrêter dès l'apparition des premières ornières dépassant le seuil critique permet de s'assurer d'avoir des ornières au maximum de 10 cm sur le reste du linéaire (encadré 2).

Du fait des enjeux économiques associés, cette décision est souvent difficile à prendre et le gestionnaire doit être soutenu par l'ensemble des services de l'agence. Il est aussi essentiel que chacun des acteurs comprenne l'importance de l'arrêt des exploitations lorsque les seuils critiques sont atteints. Des journées de formation permettent la montée en compétence des personnels techniques en interne, mais aussi en externe, avec les ETF intervenants.

Pour rappel, quand l'implantation d'un réseau de cloisonnements est impossible, l'exploitation passe par l'utilisation de méthodes alternatives à partir du réseau routier et de pistes de débardage sans circulation dans la zone boisée.

Comment imposer la circulation dans les cloisonnements ? Quelle méthodologie pour évaluer l'impact de la sortie des cloisonnements pour les procès-verbaux ?

L'ONF peut s'appuyer sur un solide cadre légal et contractuel pour sanctionner les infractions (encadré 3). Pour que celui-ci soit utile, il est essentiel de réaliser une rencontre préalable (CNPEF – article 5.2) entre l'ONF et l'intervenant en charge des opérations de mobilisation des bois pour préciser les limites de la coupe, les itinéraires de débusquage et débardage ainsi que les zones nécessitant des précautions particulières, indiquer les zones présentant déjà des ornières > 20 cm, indiquer les seuils d'alerte en matière d'orniérage, vérifier la présence d'un câble sur les engins pour débusquer les arbres non accessibles directement avec la machine et identifier les places de dépôt utilisables. Cette rencontre doit être formalisée par un écrit.

Pour diagnostiquer le pourcentage de surface circulée sur les cloisonnements et en dehors, ainsi que l'intensité de l'orniérage, on peut se référer à l'Annexe 2_1 Diagnostic impact sol de la DIA GE^a ou BFC^b. Mais attention, ce diagnostic n'a de valeur que si un état des lieux a été réalisé en amont de l'exploitation.

Encadré 2 : Les seuils d'ornières acceptables lors des exploitations forestières

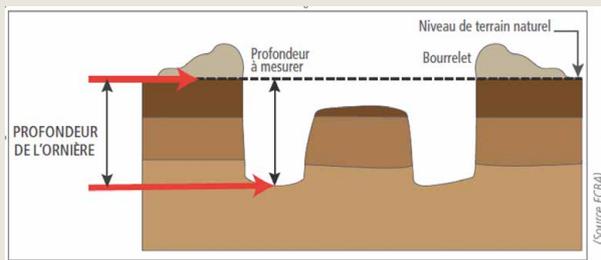
À la suite du guide PROSOL (2009) et de la NDS 09-T-297 (Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols) traitant de la sensibilité des sols forestiers et de l'installation d'un réseau de cloisonnement pour limiter la surface circulée par les machines, s'est ensuite posée la question de ce qui est acceptable ou non sur ce réseau. La notion de praticabilité est apparue.

Un travail de concertation et de recherche de compromis a été réalisé avec les entreprises de travaux forestiers et leurs représentants, le FCBA et l'ONF. Ce travail a abouti à la rédaction du guide Pratic'sols⁴ sorti en octobre 2017.

Voici quelques rappels tirés de ce guide.

Comment mesurer une ornière ?

La hauteur d'une ornière est mesurée entre le niveau le plus bas observé à un endroit donné et le niveau du terrain naturel sans bourrelet.



↑ Figure 3. Méthode de mesure d'une ornière

Est-ce grave ?

Non sur les cloisonnements. Les cloisonnements sont tassés par définition et quelques ornières sont admises tant qu'elles ne remettent pas en cause leur praticabilité à long terme.

Oui sur le sol du peuplement. La circulation entre les cloisonnements entraîne un tassement et une réduction de la circulation de l'eau. Le tassement entraîne une diminution forte de l'activité biologique et donc aussi de la capacité de production forestière.

Quels sont les seuils acceptables ?

Plutôt que de définir un niveau d'orniérage acceptable sur l'ensemble du cloisonnement, il a été défini des seuils d'alerte. En effet, suivant le type de cloisonnement, la circulation des engins est plus ou moins importante, car elle se densifie à l'approche des places de dépôt. De plus, la sensibilité potentielle peut varier à l'intérieur de la parcelle.

Les seuils d'alerte recommandés lors des travaux de concertation sont un compromis entre l'état actuel des connaissances scientifiques (dommages aux peuplements, régénération du sol...), les moyens d'exploitation forestière actuels majoritairement utilisés et le maintien de la compétitivité de la filière forêt-bois. Pour les cloisonnements dans la parcelle, le seuil est d'environ 20 cm. Pour les cloisonnements principaux ou collecteurs, le seuil est d'environ 30 cm.

Ainsi, dès l'apparition des premières ornières atteignant les seuils déterminés, il faut contacter l'intervenant (le client en vente sur pied, ou le prestataire en vente de bois façonné) pour définir les mesures à adopter. En aucun cas, il ne faut attendre que tout le cloisonnement soit impacté à ces niveaux pour réagir. Des mesures doivent être prises de façon anticipée pour ne pas atteindre ces seuils.

Comment s'organiser pour respecter les seuils d'alerte en fonction des évolutions de portance des sols ?

Le TFT donne les informations nécessaires à l'intervenant sur la circulation de ses machines sur le réseau de cloisonnement et rappelle les seuils d'alerte lors de la rencontre préalable (cf. CNPEF article 5.2 - Rencontre préalable et article 2.3.1 - Sensibilité des cloisonnements au tassement, à l'orniérage ou à l'érosion).

L'intervenant doit appliquer le mode opératoire décrit par le logigramme du guide Pratic'sols⁴ (page 19).

Dès que le seuil d'alerte est atteint, une discussion doit être engagée entre l'intervenant et le TFT pour convenir de la suite à donner en fonction :

- des évolutions annoncées de la pluviométrie ;
- du volume ou du temps nécessaire pour terminer le chantier ;
- des équipements utilisés ;
- de l'existence ou non de zones plus accessibles ou moins sensibles ;
- de la possibilité de travailler à mi-charge.

Il peut s'agir d'utiliser une des mesures préventives suivantes :

- déposer des rémanents sur le cloisonnement ;
- mettre des tracks à tuiles plates pour diminuer la pression au sol (avec la même charge utile).

Il faut ensuite voir si la situation redevient acceptable avant de suspendre le chantier.

Encadré 3 : Cadre légal et contractuel pour sanctionner les infractions

Les dispositions contractuelles du cahier national des prescriptions d'exploitation forestière (CNPEF^c) et du cahier national des prescriptions des travaux et services forestiers (CNPTSF^d), applicables à tous les intervenants (acheteurs, exploitants, entrepreneurs de travaux forestiers, transporteurs, affouagistes, cessionnaires, etc.) en forêts publiques, leur imposent de prendre toutes les mesures utiles pour limiter l'impact de leurs activités sur le sol.

Ils doivent emprunter, avec leurs engins et véhicules, uniquement :

- en cas d'exploitation, les cloisonnements d'exploitation (et non les cloisonnements sylvicoles qui sont interdits d'accès), les chemins de vidange ou itinéraires signalés sur le terrain ou désignés avant l'intervention par l'agent de l'ONF (2.3 CNPEF) ;
- en cas de travaux ou services forestiers, hors exploitation, les cloisonnements d'exploitation ou cloisonnements sylvicoles et les chemins ou itinéraires signalés sur le terrain ou désignés avant l'intervention par l'agent de l'ONF (CNPTSF).

En cas d'orniérage sur les cloisonnements, chemins ou itinéraires désignés, l'intervenant ou l'ONF suspend les interventions dans les modalités définies aux articles 2.3.1 du CNPEF et du CNPTSF.

Dès lors qu'un intervenant cause des dommages, les collectivités (propriétaire) ou l'ONF (gestionnaire de la forêt domaniale) sont légitimes à lui en demander réparation, en nature ou pécuniaire (dommages et intérêts), amiablement voire judiciairement.

Contractuellement, l'ONF a prévu des modalités d'action, de remise en état et de pénalité en fonction des situations rencontrées et de l'objet du contrat.

Pour les contrats de vente de bois sur pied ou façonnés, qu'ils soient en bloc ou à la mesure, il convient de se reporter aux clauses générales de vente de bois applicables (CGV) (Art. 16.3.5, 16.4, 19.1, 19.3.1, 34.3 dernier paragraphe (par renvoi du 34.4.2), 39.2 CGV bois sur pied (en bloc ou à la mesure); Art. 19.1, 34.4.2 dernier paragraphe, 40.2 CGV bois façonnés (en bloc ou à la mesure)).

Pour les marchés de services forestiers, sont applicables les clauses générales d'achat de prestations d'exploitation forestière (CGAPEF) ou de travaux sylvicoles (TS) (Art. 8.1, 8.2, 9.2.1, 11.2, 12.1 CGAPEF ou TS). Enfin, les clauses générales de vente de bois aux particuliers prévoient également des stipulations opposables aux affouagistes et aux cessionnaires (Art. 13, 16 clauses générales des cessions de bois aux particuliers).

Parallèlement aux actions en réparation susceptibles d'être engagées contre l'intervenant à l'origine des dommages, celui-ci peut également s'exposer à des sanctions pénales. Le code forestier punit d'une amende prévue pour les contraventions de la 5e classe (R.261-7 du code forestier), le fait de ne pas débarder les bois par les chemins désignés par les clauses de la vente résultant des dispositions de l'article R. 213-24 du code forestier (NATINF 3535).

Les suites à donner aux manquements constatés doivent être appréciées au cas par cas. L'estimation des préjudices subis ainsi que les éventuelles réclamations et actions judiciaires sont envisagées et mises en œuvre en lien avec les juristes territoriaux de l'ONF.

Un cloisonnement peut-il être remis en état ?

Restaurer le fonctionnement d'un sol déformé par la circulation des engins est complexe et dépend du type de restauration visé.

Si on souhaite restaurer la fonction de production végétale, aucune technique n'est réellement efficace pour restaurer complètement et durablement la capacité d'infiltration de l'eau, l'aération et la prospectabilité du sol par les racines. Au mieux, si on réalise le travail du sol dans les bonnes conditions d'humidité, on arrive à créer des chemins préférentiels pour l'eau, les racines et l'air. Ces chemins vont légèrement accélérer la restauration du

fonctionnement du sol par les racines et les organismes vivants dans le sol. Au pire, si on réalise le travail du sol quand il est humide, on aggrave la situation avec un lissage et des déformations du sol provoqués par l'engin et l'outil censés décompacter le sol.

Pour restaurer la praticabilité de cloisonnements très orniérés, il est nécessaire de percer mécaniquement le fond des ornières ou de les drainer en implantant des essences tolérant l'excès d'eau et le tassement.

Un cloisonnement très orniéré (ornières > 20 cm) a un fond quasiment imperméable. Reboucher les ornières sans les drainer est inefficace pour remettre en état la praticabilité du cloisonnement. Les mesures d'humidité dans ces



↑ **Figure 4.** Ornières rebouchées. La surface du sol est lisse, mais l'eau s'accumule toujours autant sur les cloisonnements. Photo N. Pousse.

ornières rebouchées montrent des valeurs très élevées, y compris en période climatiquement très sèche. C'est ce qui explique que l'engin s'enfonce de la même profondeur dès les premiers passages de l'exploitation suivante.

Pour restaurer la praticabilité de cloisonnements très ornierés, il est nécessaire de percer mécaniquement le fond des ornières ou de les drainer en implantant des essences tolérant l'excès d'eau et le tassement.

Utilisation d'une dent de sous-solage

L'utilisation d'une dent de sous-solage pour fracturer le fond des ornières est la technique la moins coûteuse des trois techniques décrites dans cet article. Le travail est à réaliser sur sol sec, trace de roue par trace de roue, en marche arrière. Un seul coup de dent de sous-solage au centre de l'ornière peut suffire pour des ornières de profondeur inférieure à 10 cm. Si les ornières sont plus profondes que 10 cm, il est nécessaire d'enfoncer la dent de sous-solage plusieurs fois (au moins deux fois) dans chaque trace de roue. Un essai mené par le FCBA en 2018⁵ montre une productivité de 80 mètres linéaires de cloisonnement (2 traces) par heure-machine-productive pour un linéaire avec 30 % d'ornières de moins de 10 cm (méthode « 1 coup ») et 70 % d'ornières de plus de 10 cm (méthode « 4 coups »). Les résultats montrent également que l'utilisation d'une petite pelle (inférieure à 8 t) permet de détecter les grosses racines et donc de les préserver.

Utilisation d'une tarière motorisée

Dans le cas de cloisonnements très profondément ornierés ou d'un matériau très peu drainant et très compact (argiles ornierées), le sous-solage peut être difficile voire impossible à réaliser. Dans cette situation, la perforation du fond des ornières à l'aide d'une tarière motorisée a été testée avec succès en Moselle, dans la forêt domaniale de Fénétrange, entre 2012 et 2022.



↑ **Figure 5.** Utilisation d'une dent de sous-solage pour drainer des ornières profondes sur sol limoneux – essai en FD de Chauv. Source : FCBA.

La méthode consiste à réaliser une perforation sur au moins un mètre de profondeur à l'aide d'une tarière mécanique de 20 cm de diamètre. Cette action a pour but d'augmenter le drainage et, par conséquent, la longueur et la fréquence des périodes où le cloisonnement est réessuyé et propice à la circulation des engins. La perforation a été réalisée tous les 4 m ou 8 m linéaires, le long de chaque trace de roue du cloisonnement. Afin d'éviter que les trous ainsi forés dans le sol ne se rebouchent et perdent de leur efficacité de drainage, des piquets de 1 m de long et 19 cm de diamètre ont été enfoncés tout de suite après la perforation. Les piquets ont été réalisés à partir d'un bois local qui se décompose relativement vite afin que, lors de l'exploitation suivante, l'efficacité de drainage des perforations soit optimale. Les deux niveaux d'écartement (4 ou 8 m) ont été suffisants pour drainer les cloisonnements fortement ornierés et permettre l'exploitation ultérieure, réalisée en 2022, sans ornierage.



↑ **Figure 6.** Dispositif de test de la restauration de la praticabilité des cloisonnements par perforation verticale profonde en Forêt Domaniale de Fénétrange. Photo dessus : ornières avant restauration. Photo dessous : perforation du fond de l'ornière et mise en place de pieux pour éviter que la perforation ne se rebouche avant l'exploitation suivante. Photos : N. Pousse et P. George.

Utilisation de végétaux

La restauration de la praticabilité des cloisonnements à l'aide de végétaux tolérant l'asphyxie et le tassement est en général moins coûteuse, mais nécessite des conditions d'éclairage spécifiques (car les végétaux tolérant le tassement sont pionniers) peu fréquentes sur les cloisonnements hors coupes définitives ou collecteurs. Lors de l'exploitation suivante, les pionniers qui ont poussé sur les cloisonnements peuvent être broyés ou utilisés comme rémanents protecteurs de la praticabilité des cloisonnements.

Une étude réalisée en Suisse⁶ a démontré l'intérêt des aulnes pour coloniser des ornières créées lors du passage d'engins forestiers et pour restaurer la porosité de ces dernières, sans remise en état préalable des cloisonnements. Sept ans après la plantation d'aulnes dans les cloisonnements, les racines atteignaient 80 cm de profondeur et les propriétés physiques des sols avaient retrouvé des valeurs similaires à celles du sol non perturbé, jusqu'à 30 cm de profondeur. L'expérimentation a été mise en place sur une parcelle dévastée par la tempête de 1999. Les aulnes



↑ **Figure 7.** Plantation d'aulnes sur collecteur profondément ornieré, dont les ornières ont été rebouchées. Photo : N. Pousse.

bénéficiaient donc d'un éclairage optimal, ce qui n'est pas le cas général des cloisonnements forestiers, mais cela peut fonctionner pour des zones circulées larges⁷. Un rebouchage des ornières avant la plantation des pionniers peut être nécessaire, notamment dans le cas d'ornières profondes.

Comment convaincre les propriétaires et les gestionnaires de l'utilité des cloisonnements d'exploitation ?

La mécanisation est aujourd'hui indissociable de l'exploitation forestière tant elle apporte confort et ergonomie de travail, ainsi que productivité en termes de volume de bois récolté par unité de temps. En particulier, dans un contexte de faible attractivité des métiers de l'exploitation forestière, la mécanisation de la récolte de bois est un atout pour permettre la mobilisation de bois issus de la sylviculture. Pour trouver le meilleur compromis entre la circulation des engins et la préservation du fonctionnement des sols et donc des écosystèmes forestiers, tous les acteurs doivent avoir toutes les cartes en main et ainsi avoir une vision d'ensemble des conséquences de chaque décision.

Convaincre les différents acteurs forestiers, que ce soient les propriétaires et les gestionnaires ou les entreprises de travaux forestiers, peut passer par une communication vulgarisée sur le phénomène de tassement des sols. Différents guides et plaquettes⁸ ont été produits et s'améliorent au fur et à mesure des retours des personnes à sensibiliser.

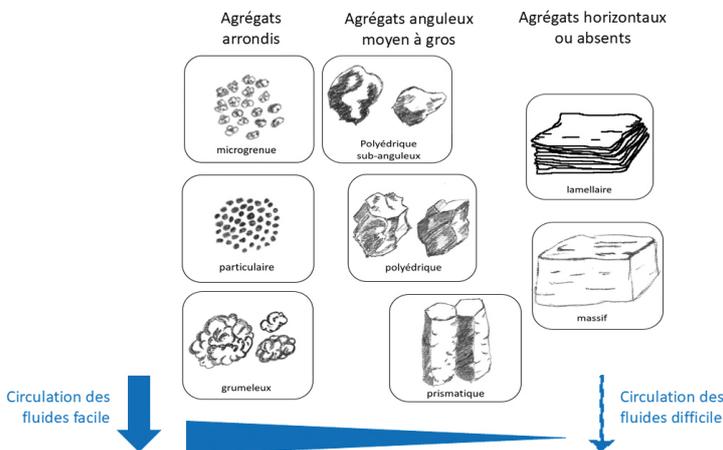
Il est également possible de montrer directement les effets du tassement du sol sur le terrain. Pour cela, plusieurs méthodes peuvent être employées.

La méthode du test bêche simplifiée

Cette méthode consiste à prélever, à l'aide d'une bêche, un bloc de sol (environ 20*20*20 cm) dans une zone non perturbée par la circulation des engins, et un bloc de sol dans une trace de passage. On peut également prélever des blocs de sol dans plusieurs traces de passage avec des intensités de passage variables. Une fois le bloc prélevé, on observe la structure du sol, c'est-à-dire la manière dont les particules solides du sol s'agencent entre elles, formant des agrégats ou des masses compactes.

Plus les agrégats sont gros, moins l'air et l'eau circulent vite dans le sol. Les deux cas extrêmes où la circulation des fluides est la plus freinée sont les structures lamellaires, où les agrégats sont orientés horizontalement au lieu de verticalement, et massives, où les agrégats ne sont pas visibles. L'horizon a alors un aspect de motte de beurre. La structure grumeleuse indique la présence de vers de terre anéciques capables d'ingérer des matières organiques et minérales. Leurs déjections prennent alors la forme de turricules à la surface du sol ou de grumeaux au sein de l'horizon. La structure grumeleuse est particulièrement stable et favorable à la prospection des racines, à la circulation et à la rétention de l'eau et à la circulation de l'air.

Quand on observe une structure lamellaire, on peut être sûr qu'il y a eu un passage d'engin. Quand on observe une structure massive, il faut comparer au bloc non perturbé pour être sûr que ce n'est pas lié à la pauvreté du sol (les limons acides forment difficilement des agrégats).



↑ **Figure 8.** La structure du sol est la façon selon laquelle sont agencées les particules solides inférieures ou égales à 2 mm (sables, limons, argiles, matières organiques ou débris végétaux) en formant des volumes élémentaires macroscopiques appelés agrégats.



↑ **Figure 9.** Exemple de deux bûchées. Celle de droite a été prélevée hors des traces de circulation, celle de gauche dans une zone où on suspectait le passage d'engin. Photo : N. Pousse.

La méthode Beerkan

Le principe est de mesurer le temps d'infiltration d'un même volume d'eau dans le sol. On enfonce, sur environ 1 à 2 cm de profondeur, un anneau de diamètre compris entre 10 et 20 cm, à l'aide d'un maillet et d'une cale en bois. L'étanchéité au bord intérieur de l'anneau est nécessaire pour éviter les écoulements préférentiels. Si besoin, on compacte très légèrement le sol le long du bord intérieur de l'anneau. On vérifie l'horizontalité de l'anneau et on coupe la végétation à l'intérieur. Pour montrer les effets du tassement sur l'infiltration de l'eau dans le sol, il suffit de comparer les temps d'infiltration du même volume d'eau dans une zone non perturbée par la circulation des engins et dans une trace de passage. Le temps d'infiltration de l'eau dans la trace de passage est beaucoup plus long. En toute rigueur, le temps d'infiltration d'au moins 10 fois le même volume d'eau doit être mesuré. Mais pour une simple démonstration pédagogique, l'utilisation d'un seul volume d'eau suffit.



↑ **Figure 10.** Méthode Beerkan : on compare les temps d'infiltration d'un même volume d'eau entre une situation tassée et une situation non tassée.

Faire le lien entre la végétation et le tassement

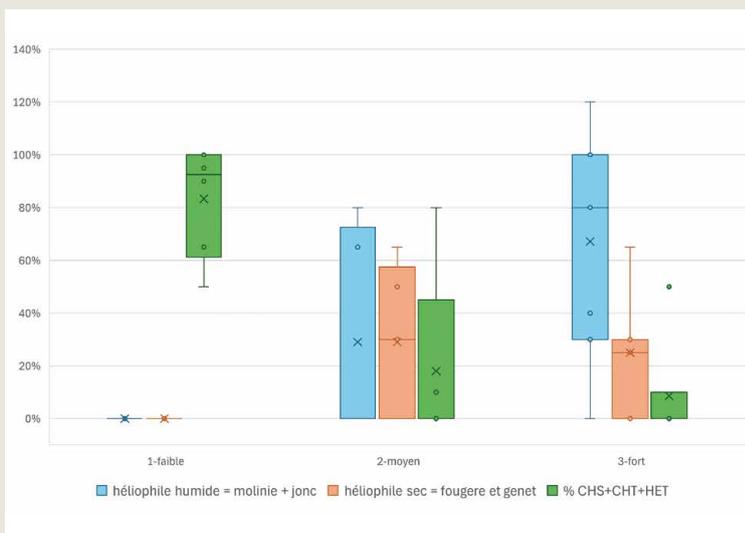
Cette méthode a été utilisée sur deux sites de sensibilisation au tassement. Le premier a été mis en place à proximité de Besançon par les référents « indicateurs de la qualité des sols forestiers », dans le cadre du projet IPRSolf, le second à proximité de Grenoble, dans le cadre du soloscope AURA. Sur les principes du « marteloscope », le « soloscope » est un réseau de sites à vocations pédagogiques et de développements techniques et scientifiques sur la gestion durable des sols (encadré 4).

Le principe est de trouver une parcelle ayant fait l'objet, il y a quelques années, d'une coupe définitive de régénération, d'une coupe de taillis, d'une coupe sanitaire ou d'une coupe rase, et de réaliser des tests bêche sous les zones de végétation homogène. Les zones les plus dégradées par le passage des engins sont en général colonisées par des graminées (molinie, jonc...). Les zones moyennement dégradées sont en général colonisées par des pionniers (tremble, bouleau, saule...) et les zones non perturbées se régénèrent. Bien sûr, cette méthode ne marche qu'en l'absence de pression importante des herbivores.

Encadré 4 : Soloscope AURA : étude du lien entre tassement et végétation



↑ Figure 11. Parcelle 11 de la forêt domaniale de Chambaran en 2012



↑ Figure 12. Soloscope AURA : pourcentage de recouvrement de la flore et des ligneux en fonction du niveau de tassement estimé par test bêche.

Une étude de la parcelle 11 de la forêt domaniale de Chambaran, coupée en 2012 sans contrôle de la circulation (figure 11), a été réalisée en 2024. L'analyse s'est appuyée sur une vingtaine de placeaux répartis de manière systématique.

Sur chaque placeau, un test bêche a permis d'estimer le niveau de tassement des sols, complété par un inventaire de la végétation dans un rayon de 2,5 m autour du point de test. Les niveaux de tassement, identifiés par des indices physiques observés lors des tests bêches, ont été classés en trois catégories : faible, moyen et fort.

Les résultats montrent que la composition floristique varie en fonction du niveau de tassement. Dans les placeaux présentant un tassement moyen, on observe l'apparition d'espèces héliophiles spécifiques aux milieux humides (molinie et jonc) et aux milieux secs (fougère et genêt). Alors que dans les placeaux au tassement fort, les espèces héliophiles de milieux humides deviennent majoritairement recouvrantes.

Parallèlement, une diminution progressive de la proportion de régénération ligneuse (du stade semis à gaulis) est constatée à mesure que le tassement du sol augmente, notamment pour les essences objectif que sont, ici, le chêne, le châtaignier et le hêtre (représentées en vert sur le graphique).

Conclusion

Le maintien d'un réseau de cloisonnements fonctionnel et adapté est une condition essentielle pour préserver la qualité des sols forestiers tout en assurant une exploitation forestière efficace et durable. En cas de dégradation, un simple rebouchage n'est qu'esthétique. Des méthodes de restauration existent, mais sont très coûteuses. Il faut donc préserver ces cloisonnements au maximum.

La clé réside dans une planification et une préparation rigoureuses, ainsi que dans le respect des seuils critiques d'orniérage, ce dernier point pouvant être facilité par une sensibilisation accrue de l'ensemble des acteurs.

Une bonne gestion des cloisonnements demande beaucoup de temps et d'implication, mais il s'agit d'un investissement sur le long terme, au service de la préservation des sols forestiers.

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Auvergne Rhône-Alpes

Diane Behr

ONF – Pôle Forêt, DT Centre Ouest Aquitaine

Sarah Garcia

ONF – Pôle Forêt et Climat, DT Bourgogne Franche-Comté

Armelle Noé

ONF - Chargée de mission sols forestiers, DT Grand-Est

Médéric Aubry

ONF – Pôle recherche, Développement et Innovation, DT Centre Ouest Aquitaine

Didier Pischedda

ONF - Expert national en exploitation forestière et logistique

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

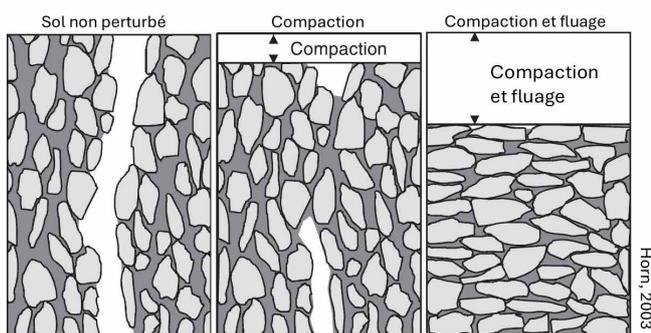
- 1 : Pousse N, Ruch P (2022) Engins forestiers à pneus et préservation physique des sols - Note de synthèse – ADEME – 5p.
- 2 : Mourey J-M, Pischedda D, Lefebvre L (2012) Implanter les cloisonnements d'exploitation. Fiche technique – Sol, ONF, 6p. <https://www.onf.fr/%2B/195::implanter-les-cloisonnements-dexploitation-forestiere.html>
- 3 : Pischedda D (coord.) (2009) Guide pratique pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL ». ONF – FCBA, 113p.
- 4 : Pischedda D, Helou TE (coord.) (2021) Pratic'sols – guide sur la praticabilité des parcelles forestières. ONF – FNET, 48p. <https://www.onf.fr/produits-services/%2B/192::praticols-guide-sur-praticabilite-des-parcelles-forestieres.html>
- 5 : Montagny X (2018) Réhabilitation de cloisonnement d'exploitation – Forêt Domaniale de Chaux p852. Présentation FCBA. Projet EFFORTE.
- 6 : Meyer C, Lüscher P, Schulin R (2014) Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. European Journal of Forest Research, 133, 453-465.
- 7 : Flores Fernandez JL, Hartmann P (2017) Restauration active des sols forestiers endommagés. Revue Forestière Française, 69, 3, 219 – 226.
- a : 8600-18-DIA-SAM-021 - Protection des sols lors de l'exploitation des bois
- b : 8400-21-GUI-SAM-004-A version Test diagnostic.pdf
- c : Cahier national des prescriptions d'exploitation forestière (CNPEF)
- d : Cahier national des prescriptions des travaux et services forestiers (CNPTSF)
- e : Plaquette de Agence territoriale Vosges Ouest : Cloisonnements d'exploitation : Quel intérêt ? <https://www.onf.fr/+2697>
- f : <https://www.afes.fr/nos-missions/reconnaitre-et-federer/projet-ipsol/>
- Pour aller plus loin : Noé A, Chiara J-P, Cortot L, Foutrier F, Guenon L, Houdy M, Huard M, Lambert J (2024) Guide des bonnes pratiques - Les cloisonnements d'exploitation. ONF Agence Aube Marne - 8682-24-GUI-GFM-001 (lien ici).



Les impacts écologiques et économiques du tassement des sols

Le tassement des sols forestiers a des impacts écologiques et économiques. Cet article détaille ces impacts, qui aboutissent à une baisse de la production et à une mortalité plus importante des arbres.

La circulation des engins modifie la structure du sol, c'est-à-dire le mode d'assemblage des particules entre elles. Cette structure détermine de nombreuses fonctions du sol : aération, infiltration et rétention de l'eau, rétention des éléments nutritifs et de la matière organique, habitats pour les organismes du sol et les racines. Le tassement regroupe l'ensemble des modifications de structure du sol (c'est-à-dire l'arrangement des particules de sol dans l'espace) qui ont lieu quand la contrainte exercée à la surface du sol est supérieure à la capacité de résistance du sol. En fonction de l'intensité de la contrainte exercée sur le sol et de son humidité, les particules solides se rapprochent les unes des autres : c'est la densification du sol. Il s'agit d'une perte de volume à masse constante. On parle également de compaction du sol. Quand le sol est humide, il a une faible résistance aux contraintes et peut également subir une modification de sa structure par fluage, c'est-à-dire par liquéfaction et réarrangement horizontal des particules entre elles.



↑ **Figure 1.** Quand les forces appliquées à la surface du sol dépassent sa capacité de résistance, les particules solides du sol (gris clair) se rapprochent les unes des autres (compaction) entraînant une diminution de la taille des espaces vides de grandes (blanc) et moyennes (gris foncé) dimensions, ainsi qu'une diminution de leur connectivité. Quand le sol est humide et qu'il subit une compaction, les particules solides fluent, s'organisent de manière plus horizontale et le volume et la connectivité de l'espace poral diminuent encore. D'après Horn (2003)¹.

Les ornières peuvent être utilisées comme indicateur de l'intensité du tassement. Toutefois, il peut y avoir une densification du sol sans apparition d'ornière.

Le tassement affecte fortement les peuplements forestiers, que ce soit pour la production, l'enracinement, la sensibilité aux sécheresses, le dépérissement ou la régénération.

Production en volume

En moyenne, les peuplements qui ont subi une compaction modérée perdent 20 % de leur production en volume². Ce chiffre est issu d'une compilation des études expérimentales mondiales. Ces études ne s'intéressent pas aux effets de l'orniérage sur les peuplements forestiers, mais bien à la compaction des sols. Sur les deux sites expérimentaux français de suivi à long terme des effets du tassement, nous retrouvons une diminution de 20 à 40 % du volume des chênes sessiles 15 ans après deux passages d'un porteur de 20 tonnes en charge (tassement modéré), ce qui est cohérent avec les autres études.

Enracinement

En moyenne, les peuplements ayant subi une densification modérée perdent 30 % de profondeur prospectable². L'impact sur les racines de diamètre supérieur à 2 mm augmente avec l'intensité du tassement, et peut aller jusqu'à la quasi-disparition de ces racines au-delà de 20 cm de profondeur³. L'oxygène diffusant plus difficilement dans le sol, les racines sont également confrontées à des périodes d'asphyxie plus fréquentes et intenses^{4,5}, mettant à mal le fonctionnement des arbres et leur nutrition.

Sensibilité aux sécheresses

En plus des effets négatifs sur les racines, le tassement diminue la recharge en eau des horizons profonds, car les transferts d'eau dans le sol sont fortement impactés avec une vitesse de transfert de l'eau dans le sol divisée par 2,4 pour un tassement modéré (profondeur moyenne des ornières < 10 cm)⁶. Ce constat est d'autant plus problématique dans un contexte de changement climatique, car les horizons profonds peuvent jouer un rôle crucial dans l'alimentation en eau des peuplements lorsque les couches de surface s'assèchent.



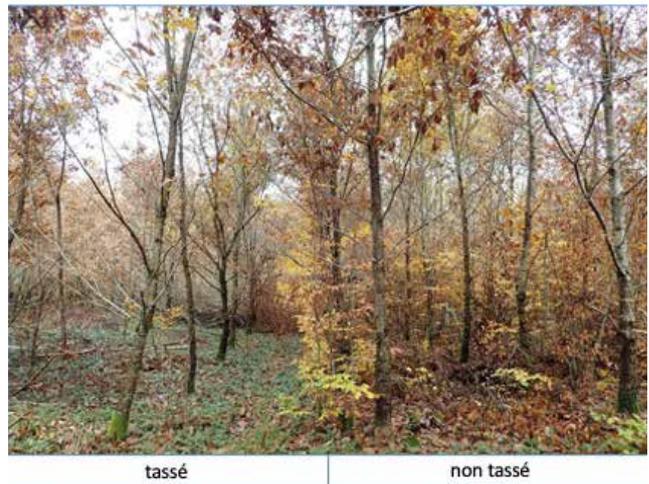
↑ **Figure 2.** Même en cas de faible orniérage, l'infiltration verticale de l'eau dans le sol est fortement réduite. Photo : N. Pousse.

Dépérissement

Les impacts du tassement sur les dépérissements sont avérés⁴ même s'ils ne sont pas encore suffisamment explorés et documentés. Gaertig et ses collaborateurs prouvent que les dépérissements de chênes sessiles et pédonculés dans le sud de l'Allemagne sont liés au déficit de diffusion de l'oxygène dès la surface du sol causé par la circulation des engins forestiers. De plus, les effets du tassement sur l'infiltration de l'eau peuvent occasionner une augmentation du risque de transfert de pathogènes entre racines. Par exemple, le tassement des sols favorise l'encre du châtaignier, causée par le champignon *Phytophthora cinnamomi*⁷.

Régénération

La régénération naturelle est fortement affectée par le tassement, les ligneux non-pionniers fuyant les zones tassées⁸. Les échecs de plantation par suite du tassement sont plus ou moins intenses en fonction des conditions météorologiques suivant la plantation et de la tolérance des plants à l'asphyxie des racines⁹.



↑ **Figure 3.** Site expérimental de suivi à long terme des effets du tassement d'Azerailles, 15 ans après un tassement modéré : le recru ligneux naturel (hêtre, charme, chêne) est dynamique dans les traitements « témoin non tassé » alors qu'il est quasi-absent et composé de saules et bouleaux dans les traitements « tassé » (1 aller – retour de porteur, densification modérée et ornière en moyenne de 5 cm). Photo : N. Pousse.

Conséquences économiques du tassement

Toutes ces conséquences du tassement ont forcément un effet sur les bénéfices économiques. À l'heure actuelle, peu d'analyses économiques permettent de chiffrer l'ensemble des impacts écologiques du tassement des sols listés ci-dessus sur des temps longs. Toutefois, en prenant uniquement en compte les impacts sur la production et les taux de survie des plants de chênes, le débardage par câble-mât s'avère plus rentable que le débardage par voie terrestre¹⁰. Le débardage par voie terrestre réalisé en bonne et due forme sur un réseau de cloisonnements pérennes respecté est beaucoup plus rentable qu'un débardage par voie terrestre sans contrôle de la circulation¹⁰. De plus, dans la pire situation de débardage par voie terrestre, où 80 % de la surface est circulée (aucun contrôle de la circulation, augmentation progressive de la surface circulée au fil des exploitations), cela aboutit à des pertes telles que la sylviculture de chêne devient sans intérêt économique.

Conclusion

Le tassement des sols est donc fortement préjudiciable écologiquement et économiquement, et ce de façon durable : tenter de décompacter un sol en vue de lui rendre ses propriétés initiales est long et coûteux, avec un résultat hypothétique. La priorité est donc à la limitation de toutes les causes de tassement et des mesures de précaution s'imposent même si on ne voit pas apparaître d'ornières à la suite du passage des engins.

Pour aller plus loin

Des dispositifs expérimentaux ont été mis en place par INRAE, avec le soutien de l'ONF, pour étudier l'effet du tassement des sols sur le long terme. Pour en savoir plus sur les résultats de ces dispositifs, il faut lire l'article dédié dans les Rendez-Vous techniques n° 77 paru en 2023⁹.

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Auvergne Rhône-Alpes

Frédéric Darboux

INRAE – Institut des Géosciences de l'Environnement

Arnaud Legout

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Horn R (2003) Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116, 77–88. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00095-8)
- 2. Mariotti B, Hoshika Y, Cambi M, et al (2020) Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes : A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 462, 118004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
- 3. Pousse N, Marcet O, Blas-Larrosa J, Schneider S (2022) Les cloisonnements sylvicoles sur sols à engorgement temporaire : à quel degré de perturbation des sols et des peuplements s'attendre ? *Les Rendez-Vous Techniques de l'ONF*, 73,16–21.
- 4. Gaertig T, Schack-Kirchner H, Hildebrand EE, Wilpert K (2002) The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 159,15–25. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00706-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00706-X)
- 5. Goutal N, Renault P, Ranger J (2013) Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. *Geoderma* 193–194, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.012>
- 6. Martin M, Chanzy A, Lassabatere L, et al (2024) Hydraulic properties for a wide range of undisturbed and compacted French forest soils : in situ measurements and estimation with the BEST method. *Annals of Forest Science*, 81 :48. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01262-7>
- 7. Fonseca TF, Abreu CG, Parresol BR (2004) Soil compaction and chestnut ink disease. *Forest Pathology*, 34, 273–283. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2004.00371.x>
- 8. Vennin S (2022) Mechanized forest operations as an emerging driver of understory vegetation change - 50 years of plant communities' composition in the Amance forest (France). Université de Lorraine - AgroParisTech, Nancy
- 9. Pousse N, Legout A, Darboux F, Ranger J (2023) Effet du tassement sur les sols et peuplements : synthèse des résultats à 10 ans sur deux sites expérimentaux dédiés. *Les Rendez-Vous Techniques de l'ONF*, 77,36–45.
- 10. Rakotoarison H, Pischedda D, Delsart M, et al (2023) Intérêt de l'exploitation par câble aérien en plaine : analyse économique à l'échelle du cycle sylvicole du chêne. *Les Rendez-Vous Techniques de l'ONF*, 77, 23–31



Outils d'aide à la décision pour la gestion durable des sols

Nous l'avons vu, il est essentiel d'adapter les pratiques d'exploitation forestière ou de renouvellement à la sensibilité du sol aux perturbations. Mais comment connaître cette sensibilité ? Noémie Pousse, Diane Behr, Sarah Garcia et Armelle Noé nous présentent dans cet article les deux outils disponibles à l'ONF : les webcartographies de sensibilité des sols et l'application For-Eval.

L'établissement de réseaux de voies dédiées à la circulation au sein des peuplements permet de limiter la surface forestière affectée par le tassement. Cependant, pour contenir efficacement la surface impactée par la circulation, les réseaux de voies de circulation doivent rester praticables sur le long terme. L'organisation des chantiers doit donc prendre en compte le risque que le cloisonnement soit trop humide pour supporter le poids des machines, c'est-à-dire sa sensibilité potentielle au tassement. Il est également indispensable d'adapter les opérations de gestion sylvicoles, depuis le renouvellement jusqu'à l'exploitation, à la sensibilité des sols à l'érosion, à l'export des menus bois, ou encore à la sécheresse. À l'ONF, deux outils existent pour estimer les différentes sensibilités des sols, sous forme de webcartographies, et d'une application.

Les webcartographies

De nombreuses cartes de stations forestières ont été élaborées depuis les années 1970. Chaque station était associée à des contraintes et potentialités spécifiques pour les peuplements forestiers. Dans le cadre de la réalisation de ces cartes, un diagnostic simplifié sur le terrain permet à l'utilisateur d'identifier la station correspondante au travers d'une clé de détermination proposée dans le catalogue de stations. Dans le catalogue, les propriétés du sol ont été décrites pour chaque station (profils types des catalogues). Ces informations peuvent aujourd'hui être exploitées pour connaître pour chaque station : la sensibilité des sols au tassement, à l'export des menus bois, à l'érosion et à la sécheresse (figure 1).

EXEMPLE TYPE : Releve 774

Coordonnées : N 46° 00' 00" E 10° 00' 00" (WGS 1984)

Altitude stationnelle : 456,700 m

Forme : 18

Type de peuplement : Tassement sans queue

Relevé géobotanique :

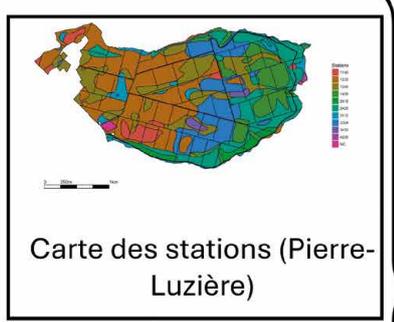
Horizon	Profondeur (cm)	Texture	Structure	Humidité	Température	Autres
0-10	0-10	FA	FA	FA	FA	
10-20	10-20	FA	FA	FA	FA	
20-30	20-30	FA	FA	FA	FA	
30-40	30-40	FA	FA	FA	FA	
40-50	40-50	FA	FA	FA	FA	
50-60	50-60	FA	FA	FA	FA	
60-70	60-70	FA	FA	FA	FA	
70-80	70-80	FA	FA	FA	FA	
80-90	80-90	FA	FA	FA	FA	
90-100	90-100	FA	FA	FA	FA	

Profil :

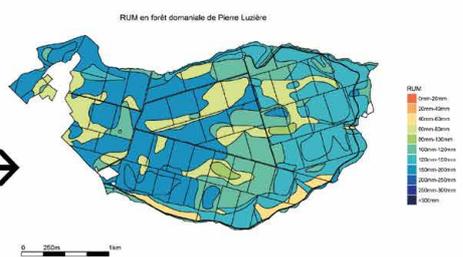
0-10 FA
10-20 FA
20-30 FA
30-40 FA
40-50 FA
50-60 FA
60-70 FA
70-80 FA
80-90 FA
90-100 FA

Relevé des caractéristiques géobotaniques :

Horizon	Texture	Structure	Humidité	Température	Autres
0-10	FA	FA	FA	FA	
10-20	FA	FA	FA	FA	
20-30	FA	FA	FA	FA	
30-40	FA	FA	FA	FA	
40-50	FA	FA	FA	FA	
50-60	FA	FA	FA	FA	
60-70	FA	FA	FA	FA	
70-80	FA	FA	FA	FA	
80-90	FA	FA	FA	FA	
90-100	FA	FA	FA	FA	



1 station = 1 RU, 1 forme d'humus, n horizons...



↑ Figure 1. Utilisation des propriétés des profils types décrits par station pour déduire des cartes de sensibilité des sols au tassement, à l'export des menus bois, à l'érosion et aux sécheresses à partir des cartes de station.

Convertir les propriétés du sol en sensibilité nécessite de gérer les données manquantes dans les descriptions des profils types (pourcentages en éléments grossiers, classe de texture, profondeur...) et les regroupements de stations réalisés dans les guides de stations. Une campagne d'acquisition de données complémentaires sur le terrain peut donc être nécessaire.

Ce travail a déjà été réalisé dans plusieurs directions territoriales. Ainsi, les cartes de sensibilité potentielle au tassement et de sensibilité à un export de menus bois sont disponibles en format webcartographie pour la DT Grand-Est (figure 2, Lien [ici](#)^a) et Bourgogne Franche-Comté (figure 3, Lien [ici](#)^b). Un travail similaire utilisant l'application For-Eval est en cours en DT COA, dans le cadre du projet de protection des sols forestiers en région Centre-Val-de-Loire, financé par l'appel à projets du Fonds Vert, qui a pour objectif d'étudier la sensibilité des sols au tassement et à l'appauvrissement chimique des forêts domaniales.

Ces webcartographies permettent une consultation rapide du niveau de sensibilité des sols d'une parcelle, facilitant ainsi la traduction en prescriptions lors des opérations de coupes et de travaux.

Attention cependant ; deux facteurs principaux peuvent altérer la qualité et la précision de ces webcartographies :

- La variabilité intra-stationnelle : une unité stationnelle regroupe souvent plusieurs types de stations, et chaque station présente une certaine variabilité interne. En sol calcaire, par exemple, la charge en cailloux limite fortement la possibilité d'évaluer la profondeur du sol, mais pas toujours la prospection racinaire, ce qui a un impact majeur sur la résistance à la sécheresse.

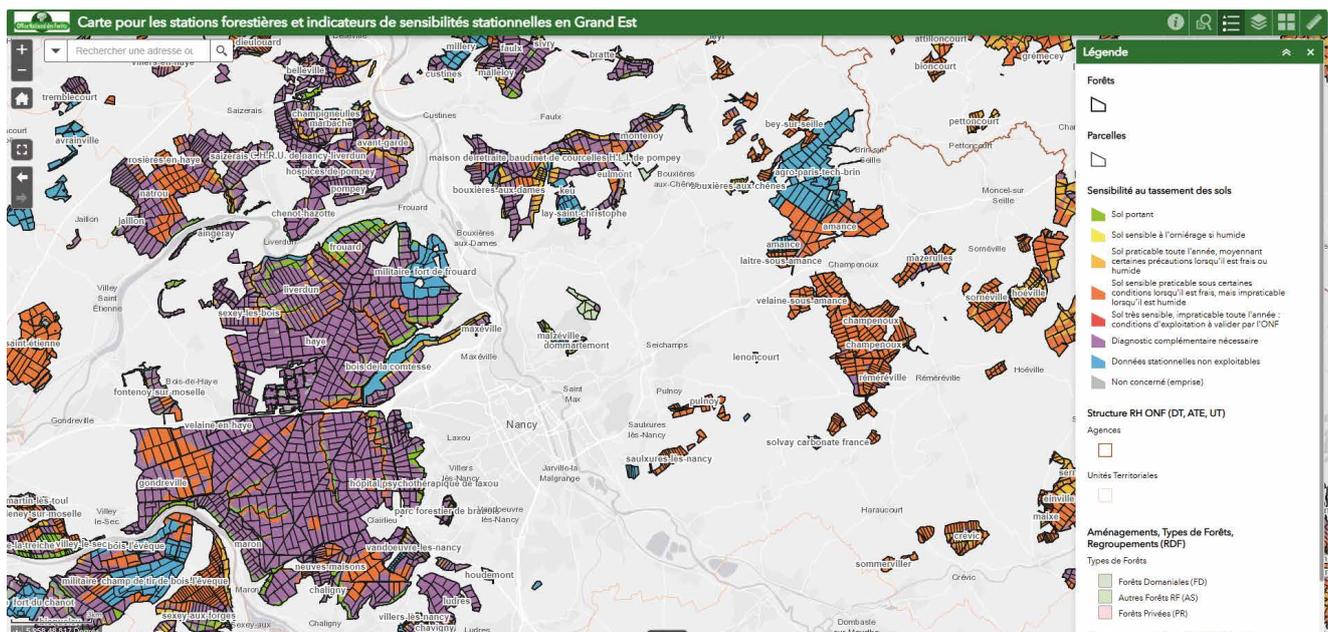
- La précision de la carte de stations : les cartes de stations sont construites avec une précision de l'ordre de l'hectare, dans un objectif de raisonnement d'aménagement à l'échelle d'une parcelle. À l'échelle d'une parcelle, des variations micro-stationnelles ou des erreurs de positionnement des limites de stations sont normales. La précision de la carte de stations est en général insuffisante pour des projets de reboisement.

L'application For-Eval

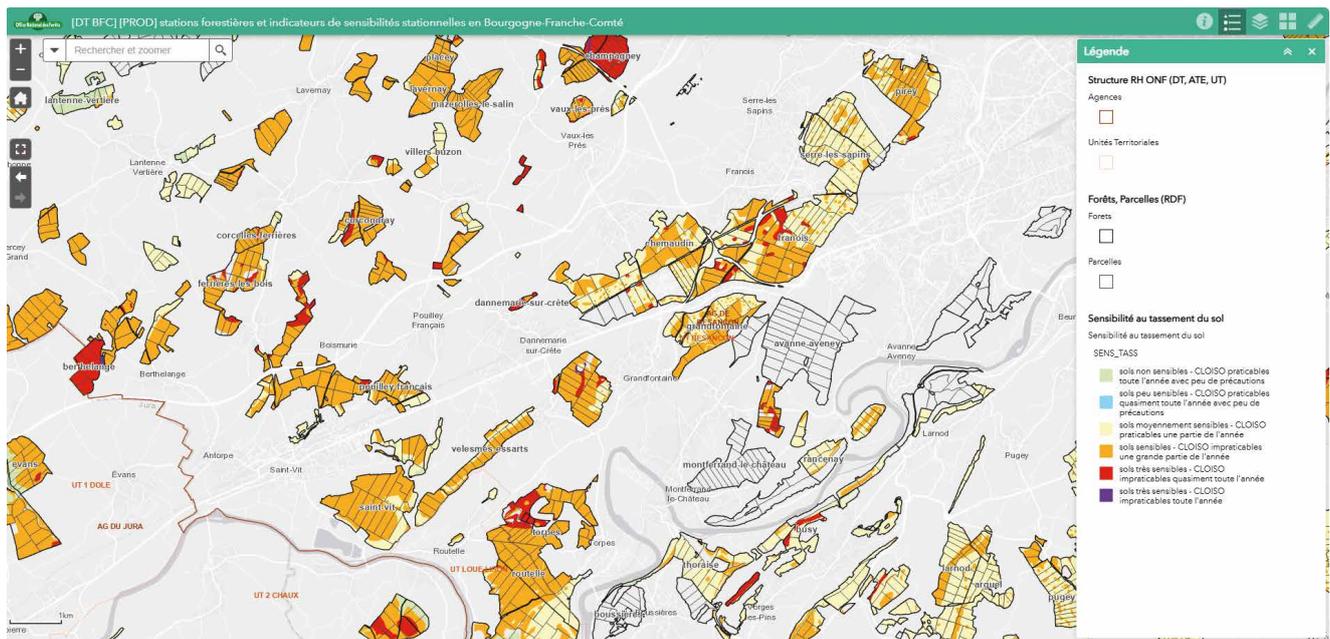
Lorsque les webcartographies de sensibilité potentielle ne sont pas disponibles ou pour affiner les données existantes sur les sols et les stations, l'application For-Eval (Forêt et Évaluations) peut être utilisée. Celle-ci guide l'utilisateur dans la description du sol pour réaliser un diagnostic instantané de sensibilité des sols, sans analyse en laboratoire, à partir des seules informations renseignées depuis le terrain. L'application aide à déterminer les paramètres clés à relever sur le terrain. Ensuite, à partir du relevé de ces paramètres clés, elle calcule les sensibilités :

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

L'application est disponible gratuitement sur le Play store Google et sur ONF store. La documentation associée permet d'expliquer les 4 indicateurs et les paramètres clés à relever sur le terrain. Des aides à la description sont disponibles au cours de la saisie du relevé. Elles permettent d'illustrer et de définir les clés de détermination des



↑ **Figure 2.** Webcarto Grand-Est : exemple de la sensibilité potentielle des cloisonnements à une dégradation de leur praticabilité estimée à partir des cartes de stations de la DT Grand-Est. Une note de sensibilité n'a pas pu être associée à toutes les stations : en violet, un diagnostic complémentaire de terrain est nécessaire (regroupement de stations hétérogènes d'un point de vue de la sensibilité au tassement), en bleu, les données stationnelles n'ont pas pu être exploitées.



↑ **Figure 3.** Webcarto Bourgogne Franche-Comté : exemple de la sensibilité potentielle des cloisonnements à une dégradation de leur praticabilité estimée à partir des cartes de stations de la DT Bourgogne Franche-Comté.

paramètres clés, comme la forme d'humus, la classe de texture ou encore le pourcentage en éléments grossiers. La playlist Diagnostique sol (Lien [ici](#))^c de la chaîne YouTube L'Association Française pour l'Etude du Sol (AFES) montre comment réaliser des diagnostics pour caractériser les sols forestiers à l'aide de l'application For-Eval.

Lors du projet IPRSol (Lien [ici](#))^d, financé par l'ADEME, un réseau de référents « indicateurs de la qualité des sols forestiers » a été créé. Les référents sont issus de l'ONF, des coopératives forestières, du CNPF, de PEFC, des chambres d'agriculture et de bureaux d'études, et peuvent être localisés sur une carte en ligne depuis le site de l'AFES (Lien [ici](#))^e. Ils sont capables de réaliser les diagnostics inclus dans For-Eval et de sensibiliser d'autres acteurs de la filière forêts-bois à la nécessité de réaliser ces diagnostics pour identifier la gestion la plus adaptée à la sensibilité des sols.

Conclusion

Nous ne sommes donc pas démunis lorsqu'il s'agit de caractériser la sensibilité des sols, que ce soit vis-à-vis du tassement, de l'export des menus bois, de l'érosion ou des sécheresses. Et les spécialistes du sol s'organisent pour aider l'ensemble des forestiers à réaliser les diagnostics de sol indispensables à une gestion forestière durable.

Les données collectées avec l'application For-Eval peuvent être envoyées vers l'INRAE dont les scientifiques améliorent en continu nos connaissances sur les sols en collaboration avec de nombreux partenaires (Liens [ici](#)^f et [ici](#))^g. Pour améliorer nos connaissances sur les sols forestiers, un projet, nommé SPADOFOR (capitalisation, modélisation, spatialisation et valorisation des données pédologiques forestières) financé par l'ADEME et piloté par l'unité Info&Sols de l'INRAE, démarre en 2025. Il a pour objectif de compléter nos connaissances sur les sols des forêts publiques et privées et de les spatialiser. Si la précision des cartes de propriétés produites est suffisante, nous pourrions en déduire des cartes de sensibilité des sols forestiers pour aider à la décision dans les zones non couvertes par des cartes de station.

En interne, à l'ONF, un projet de récupération et valorisation cartographique des données For-Eval collectées par les agents est en cours.

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Auvergne Rhône-Alpes

Diane Behr

ONF – Pôle Forêt, DT Centre Ouest Aquitaine

Sarah Garcia

ONF – Pôle Forêt et Climat, DT Bourgogne Franche-Comté

Armelle Noé

ONF - Chargée de mission sols forestiers, DT Grand-Est

LIENS

- a : <https://portailsig.onf.fr/portal/apps/webappviewer/index.html?id=1cf84fa4df114e018b45832cc41c10cd#>
- b : <https://portailsig.onf.fr/portal/home/item.html?id=f3e2e667823e455fbb669046dd72f537&fromSearch=true&searchPosition=2&searchTerm=station>
- c : https://www.youtube.com/playlist?list=PLzju16p_LSwhndvkBS26Qgql-fmYN4b03

- d : <https://www.afes.fr/nos-missions/reconnaitre-et-federer/projet-ipsol/>
- e : <https://www.afes.fr/nos-missions/reconnaitre-et-federer/reseau-des-referents-qualite-des-sols-forestiers/>
- f : <https://www.gissol.fr/>
- g : <https://sols-et-territoires.org/>



Le service climatique de praticabilité des cloisonnements : un outil en cours de développement pour mieux programmer les exploitations en fonction des prévisions météorologiques

Nous l'avons vu, impossible de réaliser des exploitations lorsque le sol n'est pas suffisamment portant, sous peine de rendre les cloisonnements impraticables sur le long terme. Mais interrompre un chantier coûte cher, notamment parce qu'il faut déplacer les machines. Pour limiter ces déplacements inutiles, INRAE et l'ONF développent un outil qui devrait permettre d'adapter la programmation des exploitations forestières en fonction des prévisions météorologiques.

Problématique – objectif

Les effets potentiellement néfastes de la circulation des engins forestiers sur les sols et par voie de conséquence sur les peuplements forestiers ont lieu dès les premiers passages. Ils ne sont pas réversibles à moyen terme. Par conséquent, il est essentiel de concentrer cette circulation sur des voies dédiées (cloisonnements) qui doivent rester praticables à long terme pour ne pas progressivement augmenter la surface impactée par la circulation. En effet, une fois le sol orniéré et tassé, l'eau ne s'infiltré que très lentement dans le sol, rendant les conditions de circulation pour les futures opérations très difficiles.

L'ambition du projet VSoilForOAD financé par l'ADEME était d'apporter une information en temps réel sur l'évolution de l'état hydrique des cloisonnements et de le prédire pour les 14 jours suivants. Cette information objective est cruciale pour améliorer l'organisation des chantiers et prévenir les effets négatifs de la circulation des engins sur la praticabilité des cloisonnements.

L'objectif était d'abord de tester la faisabilité et la pertinence d'un service climatique d'aide au maintien de la praticabilité à long terme des voies de circulation en forêt.

Le service climatique envisagé consiste à coupler des données météorologiques observées et prévisionnelles avec un modèle capable de simuler en temps réel le degré de saturation en eau des cloisonnements, tout en demandant à l'utilisateur un minimum d'informations.

Pourquoi un modèle ?

La teneur en eau des sols au moment de la circulation des engins forestiers est un des facteurs principaux d'orniérage et de tassement, mais elle est difficile à évaluer par le gestionnaire forestier, l'entrepreneur de travaux forestiers ou l'exploitant forestier, ce qui constitue un frein important à l'évaluation précise du risque de dégradation de la praticabilité des cloisonnements. Le développement d'outils d'aide à la décision, laissant moins de place à l'expertise ou à la subjectivité de l'opérateur, est devenu une nécessité pour répondre aux attentes des praticiens et aux enjeux de protection des sols et des fonctions qu'ils assurent. Pour créer un outil de diagnostic de portance des sols, deux options ont été considérées à l'échelle nationale et internationale.

La première consiste à déployer un réseau d'observatoires des impacts sur la praticabilité (niveau d'orniérage) en fonction de tous les engins forestiers croisés à toutes les conditions biophysiques locales, comme par exemple pour créer l'outil de diagnostic PROFOR¹. PROFOR est un outil permettant de calculer pour une opération donnée, une teneur en eau maximale tolérable, à partir d'une relation empirique combinant les variables « sol x engin x pneumatiques x teneur en eau ». Cette option requiert un investissement conséquent et constant (évolution des engins) dans l'expérimentation et ne permet pas d'accéder à la prédiction dynamique de la portance. Lors de l'utilisation de PROFOR, l'utilisateur saisit les caractéristiques de l'engin qui va circuler et les propriétés mécaniques stables du sol. L'outil calcule l'humidité à ne pas dépasser pour éviter que le sol ne se transforme en boue et que le cloisonnement perde sa praticabilité future. L'opérateur doit alors mesurer l'humidité du sol au début du chantier pour décider si l'engin est autorisé ou pas à circuler sur les cloisonnements². Dans la pratique, la mesure d'humidité est rare. Si elle est réalisée, elle s'effectue sur le terrain par les praticiens forestiers selon leur expertise et leur connaissance. De plus, pour planifier un chantier, il est nécessaire de connaître l'évolution probable de la teneur en eau sur plusieurs jours, selon les conditions météorologiques, ce que ne propose pas cet outil.

La deuxième option consiste à utiliser des modèles pour prévoir l'accessibilité des parcelles en fonction des caractéristiques locales du site, des engins et des conditions météorologiques^{3,4}. Cette option nécessite de mesurer les paramètres d'entrée des modèles, ce qui peut être complexe pour des opérateurs de terrain. Vega-Nieva et ses collègues³ ont développé un outil permettant de prédire les variations journalières de la praticabilité des sols forestiers en fournissant des cartes de prévision de la teneur en eau des sols et de profondeur d'ornière potentielle. Cet outil prometteur est difficilement utilisable en mode opérationnel puisqu'il a besoin de nombreuses données d'entrée et doit être calibré sur chaque couple site-machine. Salmivaara et ses collègues⁴ ont développé un modèle prédisant les profondeurs d'ornières. Les données nécessaires à ce modèle sont des données topographiques, d'inventaires forestiers, de résistance à la circulation mesurée par les machines d'exploitation et d'humidité. L'humidité au moment du chantier est également prédite par un modèle de bilan hydrique validé à l'échelle de bassins versants finlandais. Cette étude montre l'intérêt de ce genre de prédictions : elles permettent d'optimiser la circulation des engins (meilleurs taux d'utilisation des engins, moindres coûts de déplacements inutiles des machines) en limitant leurs impacts (moindres coûts de remise en état des cloisonnements). Cependant, le modèle n'a été calibré qu'à partir d'un seul test machine et de relevés (profondeur d'ornière, humidité) réalisés le long des traces de circulation. La dynamique temporelle prédite n'a pas été validée.

Le modèle `forest_soil_practicability_prevision_tool`, développé dans le cadre du projet VSoilForOAD, a pour objectif de prédire, en temps réel, le niveau d'humidité des cloisonnements, à partir d'informations à la portée des forestiers.

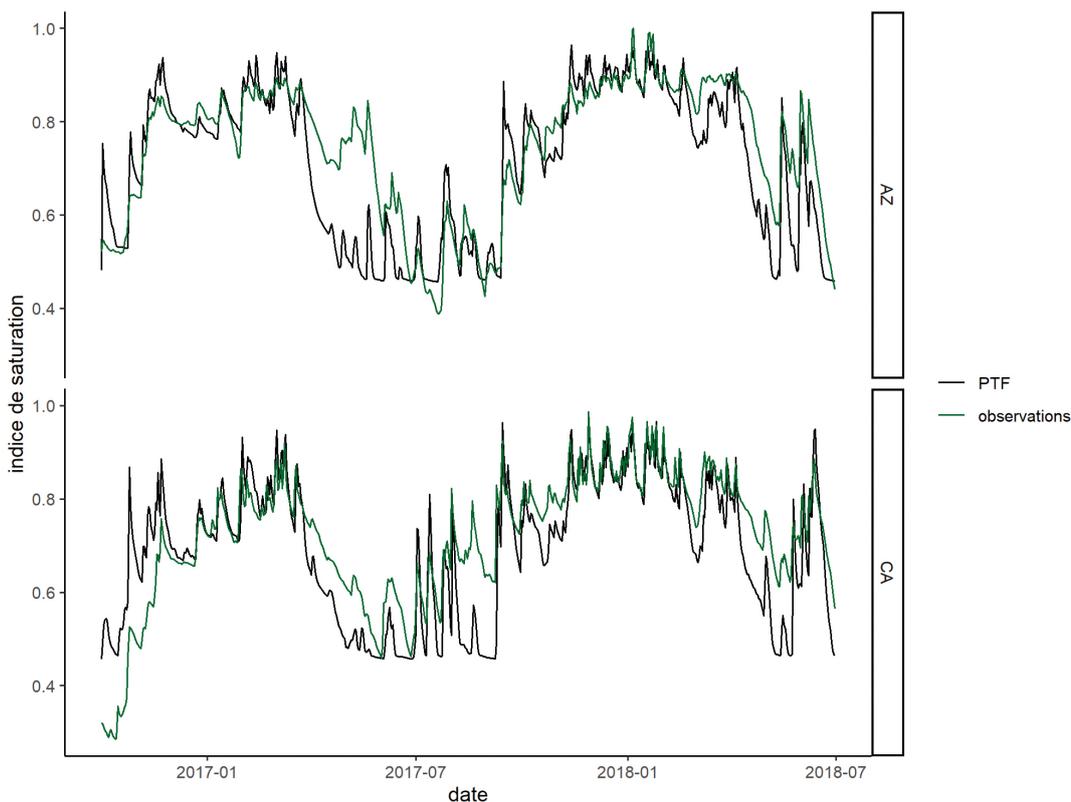
Caractéristiques du modèle initial

Le projet VSoilForOAD a démarré avec le développement du prototype de service climatique, nommé `forest_soil_practicability_prevision_tool` prochainement disponible sur la plateforme logicielle de modélisation VSoil (vsoil.hub.inrae.fr) développée à INRAE. C'est un modèle mécaniste capable de simuler les transferts d'eau dans un profil vertical de sol forestier non perturbé et tassé. Il a été développé à partir du modèle PASTIS (Prediction of Agricultural Solute Transfer In Soils) créé par Lafolie⁵ puis amélioré par Findeling et ses collègues⁶ et est disponible dans la plateforme VSoil. PASTIS est un modèle mécaniste décrivant le système sol-plante-atmosphère. Il est capable de simuler de manière fiable et robuste les transferts d'eau et de chaleur dans un profil vertical de sol. Des processus supplémentaires ont été ajoutés au modèle au cours de la thèse de Manon Martin⁷ et du projet VSoilForOAD. Ces processus supplémentaires décrivent les transferts d'eau entre les arbres, la litière et les sols forestiers.

Un jeu de données de suivi de l'humidité des sols forestiers sur 7 sites expérimentaux a permis de valider le prototype et de tester la simplification de son paramétrage. Des tests d'infiltration d'eau dans les cloisonnements et dans la bande boisée non circulée ont été réalisés pour déterminer les changements de paramètres hydrodynamiques induits par le tassement ainsi que la restauration naturelle des sols entre deux passages d'engin^{8,9}.

Simplification du paramétrage du modèle

Afin de simplifier le paramétrage du modèle tout en restant le plus fiable possible dans les prédictions de la dynamique hydrique des sols forestiers, une analyse de sensibilité du modèle a été menée. Une analyse de sensibilité consiste à faire varier les valeurs prises par certains paramètres en entrée du modèle pour déterminer quels sont, parmi eux, ceux qui influencent le plus les résultats de simulations. L'analyse de sensibilité a montré que les paramètres d'entrée les plus importants à bien caractériser sont les propriétés hydrodynamiques des sols, qui décrivent la capacité de rétention et d'infiltration de l'eau dans le sol. D'autre part, un travail conséquent a été mené pour trouver la meilleure estimation possible des propriétés hydrodynamiques des sols en fonction de la classe de texture des sols (PTF = fonction de pédotransfert). Ce travail a permis d'aboutir à un prototype de service climatique capable de simuler, en temps réel, la dynamique hydrique des cloisonnements et des parcelles non cloisonnées, à partir d'un minimum d'information fournies par l'utilisateur : la localisation (lien avec les données climatiques), le type de peuplement (sempervirent ou non), la pente moyenne de la parcelle, la classe de texture et l'épaisseur des horizons.



↑ **Figure 1.** Le paramétrage simplifié du prototype de service climatique (PTF, ligne noire) permet de simuler une dynamique hydrique très proche de celle observée (observations, ligne verte) dans le traitement tassé des deux sites de suivi à long terme des effets du tassement (Azerailles = AZ et Clermont-en-Argonne = CA)

Test du modèle

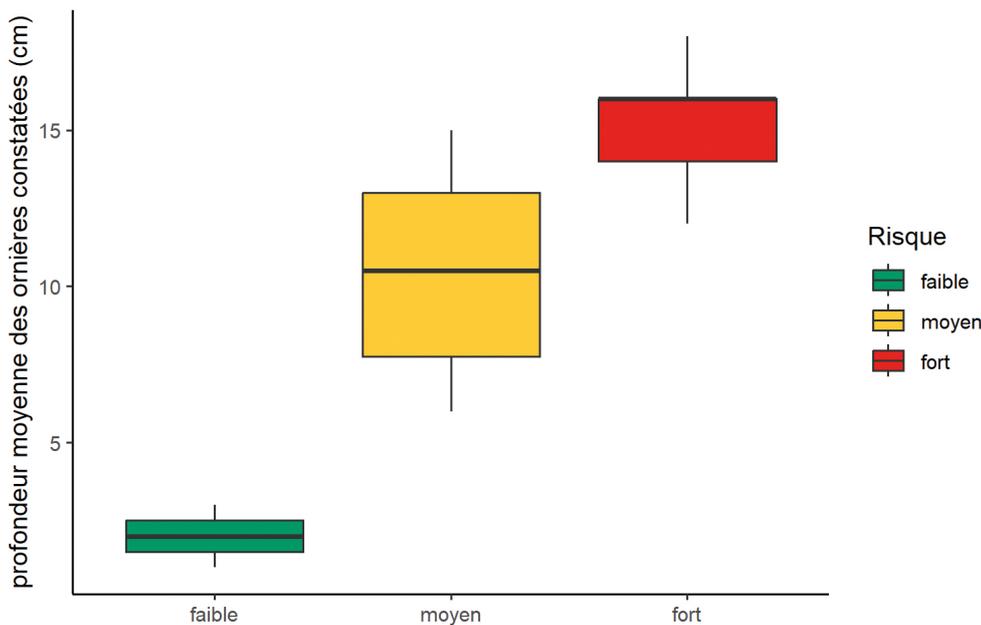
Vingt-deux chantiers d'exploitation réalisés en 2022 et 2023 dans des forêts privées et publiques ont permis de tester le modèle en conditions opérationnelles¹⁰. Les dates de réalisation des chantiers devaient être connues de manière précise pour collecter les conditions météorologiques enregistrées. Les parcelles ont fait l'objet de descriptions simplifiées (classe de texture et épaisseur des horizons de sol, pente moyenne, type de peuplement) pour paramétrer le modèle. Les profondeurs d'ornières ont également été mesurées sur les cloisonnements après l'exploitation. Pour chaque chantier, le modèle a permis de simuler l'humidité du sol au moment des interventions des engins et de calculer un risque d'orniérage basé sur le rapport entre cette teneur en eau simulée et le seuil de praticabilité pour ce chantier. Le seuil de praticabilité correspond à la teneur en eau du sol après ressuyage rapide (après drainage de l'eau non liée aux particules de sol). Le niveau de risque d'orniérage est classé en trois catégories (faible, moyen et fort) selon les règles suivantes : on calcule le rapport entre l'humidité maximale de la couche 0-25 cm prédite par le modèle au cours du chantier et le seuil de praticabilité, ce rapport est nommé ratio de saturation maximal. Si ce ratio est inférieur à 60 % ou compris entre 60 et 120 % ou supérieur à 120 %, le risque

d'orniérage est respectivement faible, moyen ou élevé. On observe que l'orniérage constaté est d'autant plus important que le risque d'orniérage calculé par le modèle est élevé, ce qui montre que le prototype de service climatique basé sur le modèle est cohérent avec les impacts au sol réellement constatés à l'issue des chantiers.

Améliorations et mise en service du modèle

À l'issue du projet VSoilForOAD, le prototype de service climatique a été considérablement amélioré. Pour faciliter son utilisation par des praticiens, son paramétrage a été simplifié tout en préservant sa fiabilité.

Il est maintenant nécessaire d'élargir le test opérationnel du prototype (sols argileux à très argileux, conditions plus sèches pour les sols limoneux et équilibrés, conditions plus humides pour les sols sableux, sols plus pentus et sols à moyenne et forte charge en éléments grossiers) avant de développer le service climatique final. Cependant, la version logicielle actuelle du prototype est peu facile d'accès pour un utilisateur non averti, ce qui limite son utilisation à plus large échelle.



risque d'ornièrage basé sur le ratio de saturation maximal calculé par le modèle

↑ **Figure 2.** Relation entre la profondeur moyenne des ornières constatées sur les cloisonnements à la suite des chantiers réalisés en conditions opérationnelles et le niveau de risque d'ornièrage calculé par le prototype de service climatique.

Pour élargir le test de pertinence du prototype de service climatique en conditions opérationnelles, le développement d'une interface intermédiaire basée sur un serveur distant accessible aux différents organismes forestiers est en cours. Le service climatique final, qui sera développé après le test opérationnel élargi, aura pour public cible tous les opérateurs concernés par l'exploitation forestière (gestionnaires, entrepreneurs de travaux forestiers...). Il devra, de ce fait, être le plus simple d'utilisation possible.

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Auvergne Rhône-Alpes

Nicolas Beudez

INRAE - UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

André Chanzy

INRAE - UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

Stéphane Ruy

INRAE - UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

BIBLIOGRAPHIE

- Ziesak M (2003) Avoiding soil damages, caused by forest machines. 2nd Forest Engineering Conference, 12-15 May 2003, Växjö Sweden.
- Matthies D, Ziesak M, Kremer J (2006) Le logiciel ProFor : un outil de prévention pour juger de la praticabilité des sols lors de l'exploitation forestière. Les Rendez-Vous Techniques de l'ONF, 14, 3–8.
- Vega-Nieva DJ, Murphy PNC, Castonguay M, et al (2009) A modular terrain model for daily variations in machine-specific forest soil trafficability. Canadian Journal of Soil Science, 89, 93–109. <https://doi.org/10.4141/CJSS06033>
- Salmivaara A, Launiainen S, Perttunen J, et al (2021) Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. Forestry, 93, 662–674. <https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPAA010>
- Lafolie F (1991) Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of the root water potential. Fertilizer Research, 27 :215–231. <https://doi.org/10.1007/BF01051129>
- Findeling A, Garnier P, Coppens F, et al (2007) Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. European Journal of Soil Science, 58 :196–206. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00826.x>
- Martin M (2019) Développement d'un modèle de transfert hydrique des sols forestiers partiellement tassés dans un contexte de données parcimonieuses. Thèse de doctorat, Université d'Avignon, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02518560>
- Martin M, Chanzy A, Lassabatere L, et al (2024) Hydraulic properties for a wide range of undisturbed and compacted French forest soils : in situ measurements and estimation with the BEST method. Annals of Forest Science, 8, 48. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01262-7>
- Martin M, Chanzy A, Lassabatere L, et al (2024) Characterization and prediction of hydraulic properties of traffic-compacted forest soils based on soil information and traffic treatments. Annals of Forest Science, 81,47. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01265-4>
- Schmitt E (2023) Test d'un service climatique de prédiction de la praticabilité des voies de circulation en forêt. Mémoire de stage AgroParisTech, 59p.



Préserver les sols forestiers de l'érosion

Nous aborderons rapidement l'érosion des sols dans ce dossier, non pas que l'enjeu soit faible, mais simplement parce que le numéro 79 des Rendez-Vous techniques y est consacré. Frédéric Darboux, chercheur à INRAE et spécialiste de l'érosion des sols, revient pour nous sur les éléments clés de ce numéro que vous pouvez retrouver sur le site internet de l'ONF.

Les sols peuvent subir des altérations lors de leur érosion par l'eau. Le ruissellement arrache, transporte puis laisse sédimenter des particules minérales et organiques. Ce phénomène commence par la surface, qui est souvent la partie la plus riche en termes de fertilité chimique et peut aboutir à exposer les horizons minéraux initialement sous-jacents. Ainsi, du fait de l'érosion, les sols s'amincissent. Les plantes disposent alors d'un support plus mince pour s'ancrer et s'alimenter, car les réserves en eau et les stocks de nutriments sont plus faibles. Ainsi, du fait de l'érosion, les versants deviennent moins fertiles. L'érosion peut aussi affecter les infrastructures de circulations, amenant des ravines à les entailler. Au-delà de la gêne occasionnée, les reconstituer a un coût. Plus en aval, la terre arrachée va sédimenter. Si la sédimentation se produit sur le versant ou à son pied, cela transfère de la fertilité (mais est-ce souhaitable ?). Si la sédimentation survient dans une mare ou un cours d'eau, cela crée de la turbidité et peut causer des envasements. Ces deux effets sont le plus souvent perçus comme une menace pour les milieux aquatiques.

L'érosion des sols est un phénomène bien décrit, même s'il passe la plupart du temps inaperçu au non-spécialiste. En fait, quand le non-spécialiste constate de l'érosion, c'est souvent qu'il y a déjà beaucoup d'érosion !

Il est bon de connaître quelques règles générales pour comprendre le phénomène, afin, dans un second temps, de lutter contre. En voici quelques-unes.

L'érosion des sols par l'eau est un transfert de l'amont vers l'aval. Cela signifie que lorsque l'on constate un problème d'érosion à un endroit donné, la cause — et donc la solution — peut être plus haut dans la pente. Ainsi, ce n'est donc pas forcément à l'endroit où l'on observe le phénomène qu'il faut mettre en place les mesures de lutte.

Sur un versant ou un bassin versant, il y a des chemins préférentiels d'écoulement : c'est à ces endroits que se localise le ruissellement, et donc l'érosion et le transfert de particules. Identifier ces chemins préférentiels est primordial pour limiter les distances de transferts et les connexions entre l'amont et l'aval. On cherchera ainsi à installer des

« barrières » (fascines, revers d'eau, etc.) aux bons endroits dans le paysage afin que les matériaux disponibles sur les versants sédimenter le plus tôt possible.

La cause fondamentale de l'érosion des sols est la pluie. Si l'on ne peut pas contrôler les pluies, on peut tenter de limiter la transformation de la pluie en ruissellement. C'est d'un intérêt majeur, car sans ruissellement, pas d'érosion ! La végétation intercepte la pluie, au moins en partie ; c'est toujours ça de pris ! On fera donc attention de toujours garder un couvert végétal protecteur, vivant ou mort, notamment dans des phases d'éclaircies et/ou de renouvellement des peuplements ; notons que les branchages et rémanents laissés au sol contribuent aussi à ce rôle protecteur. Le ruissellement peut souvent être décrit comme « l'eau qui ne s'infiltré pas » : le tassement, largement abordé par ailleurs dans ce dossier, est ainsi un facteur majeur qui favorise l'apparition du ruissellement.

Malgré ces efforts, il y aura peut-être des cas où du ruissellement apparaîtra tout de même. On essaiera alors de diriger le ruissellement vers des zones infiltrantes. On tentera aussi de limiter la capacité du ruissellement à arracher les particules (en termes techniques, on dit « faire baisser son érosivité »). Là aussi, on aménagera les chemins d'écoulement pour le ralentir. On favorisera aussi la sédimentation afin que les particules ne soient pas transférées trop loin sur les versants.

Outre les aspects de lutte contre l'érosion, le problème doit être traité avant qu'il n'apparaisse. Cela passe par l'adoption de quelques réflexes en gestion forestière, notamment choisir un système d'exploitation adapté à la sensibilité du sol, ne pas circuler en dehors des pistes, traînes ou cloisonnements, arrêter le chantier avant de dégrader la praticabilité de la desserte et des cloisonnements, laisser les menus bois au sol et limiter les perturbations du sol lors du renouvellement. Des méthodes pour préserver les zones humides et les cours d'eau sont également décrites, comme l'aménagement adapté de la desserte, la mise en place de décharges d'eau régulières et de pièges à sédiments entre la voie de circulation et la zone humide ou le cours d'eau.

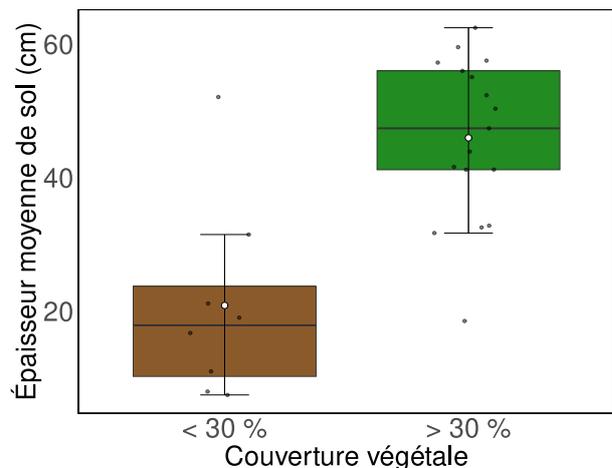
L'érosion des sols n'est jamais une fatalité et différents services de l'ONF prennent une part active dans sa limitation et quelques exemples sont détaillés ci-après. Ainsi, l'Agence Vosges Montagne a mené une cartographie du risque érosif spécifique aux pistes, méthode qui pourrait être étendue. Parce que l'érosion peut mettre en danger les biens et les personnes – soit directement, soit au travers de crues torrentielles – des forêts sont gérées afin de diminuer cet aléa grâce à l'expertise du RTM.

Si la pente est souvent vue comme un facteur important, il n'est cependant pas nécessaire de se situer en milieu montagnard pour être concerné. Ainsi, les sols de la forêt de Fontainebleau subissent de l'érosion liée à une forte fréquentation du public. Le problème est bien identifié et les différents acteurs de la forêt ont su se mobiliser pour le circonscrire.

Comme nous l'avons dit plus haut : l'une des premières mesures permettant de préserver les sols de l'érosion est de conserver un couvert végétal. La forêt est donc un facteur limitant l'érosion. Or, une bonne partie du couvert peut disparaître à la suite d'un incendie. Qui plus est, l'incendie déstructure le sol, facilitant l'arrachement des particules. Les services DFCI (Défense des Forêts contre les Incendies) et RTM (Restauration des Terrains de Montagnes) de l'ONF réalisent des diagnostics post-incendie afin d'évaluer le potentiel d'érosion. Cela permet de cibler les moyens vers les zones les plus à risques.

Des personnels d'INRAE mènent des études sur l'érosion des sols forestiers, en particulier sur les centres de Nancy (laboratoire BEF) et de Grenoble (laboratoire IGE). Ces travaux de recherche visent à mieux comprendre le phénomène et à hiérarchiser les facteurs le contrôlant, afin, à terme, de proposer des solutions/itinéraires qui limitent le phénomène. Ainsi, des placettes expérimentales de 200 m² ont été installées en forêt vosgienne. Ce dispositif « lourd » permet de mesurer les flux ruisselés et érodés à l'échelle de chaque évènement pluvieux. Il nécessite des instruments scientifiques et une alimentation électrique. Après quelques années de suivi permettant d'établir le comportement hydro-érosif sous forêt, deux placettes ont subi une coupe rase, avec ou sans tassement modéré. Le suivi va durer quelques années pour en estimer les conséquences. De nouveaux traitements seront ensuite mis en place, afin d'en apprendre plus. Dans tous les cas, ce dispositif n'est pas fait pour reproduire les opérations forestières, mais pour identifier les processus ; c'est donc une démarche plutôt fondamentale.

En complément, pour étudier l'effet des pratiques forestières, des dispositifs légers et ne nécessitant pas de source d'énergie ont été mis au point. De faibles emprises, ils peuvent être facilement installés en forêt pour mesurer les conséquences des pratiques actuellement en œuvre. Leur déploiement dépendra de la volonté des acteurs et de la disponibilité des crédits.



↑ **Figure 1.** Boîtes à moustache des épaisseurs de sol moyennes observées sur les versants prospectés. Différence significative au test Anova pour un seuil de 5 % (p-value = 0.00016).

Enfin, depuis la parution du numéro 79 des Rendez-Vous techniques consacré à l'érosion des sols, une campagne de mesures a été effectuée dans la forêt RTM du Brusquet (Alpes-de-Haute-Provence). Il s'agissait de mettre en évidence l'effet d'un siècle de reboisement sur la ressource en sol. Est-ce que les zones de marnes noires les plus reboisées disposent à présent de sols plus épais, et donc avec une plus grande fertilité, en comparaison des zones où la reforestation a été limitée ? Ce travail a été réalisé par Axel Tavernier (élève-ingénieur à l'Institut agro Montpellier) en 2024. À l'aide de sondages pédologiques, les profondeurs de sols ont été mesurées dans des secteurs où la végétation (toutes strates confondues) couvre plus ou moins de 30 % de la surface. Les résultats (figure 1) montrent une forte variabilité des épaisseurs de sol : entre 10 cm et 32 cm quand la végétation couvre moins de 30 % de la surface ; entre 20 cm et 63 cm pour une végétation couvrant plus de 30 % de la surface. Cette variabilité est attendue, car il y a des différences de pente, d'exposition des versants, de lithologie, de type de végétation et de durée d'installation de la végétation, etc. Cependant, on met en évidence un clair effet de la végétation sur l'épaisseur de sol : les zones dans lesquelles la reforestation a été la plus efficace ont en moyennes des sols deux fois plus épais. Cela confirme l'intérêt sur le long terme de la reforestation : les sols y sont moins érodés donc plus épais, et deviennent plus fertiles, contribuant ainsi au développement de la forêt. On entre ainsi dans un cercle vertueux.

Au niveau européen, un inventaire de l'état des sols¹ rapporte que la déforestation, la mauvaise gestion, le changement climatique et les feux de forêts sont les principales causes d'augmentation de l'érosion. Au niveau du climat, la moitié nord de la France semble devoir être concernée par une hausse des précipitations et la moitié sud par une hausse des périodes de sécheresse. Même s'il n'est pas facile de prévoir les conséquences directes en termes d'érosion,

cela va sans aucun doute affecter l'intensité des phénomènes d'érosion. Le risque érosif deviendra plus prégnant dans les secteurs où se combineront :

- une plus grande sévérité des sécheresses et une augmentation de leur fréquence, car cela diminuera le couvert végétal et ralentira la reprise de la végétation ;
- une augmentation de la sévérité des pluies (en termes d'intensité, mais aussi de fréquence). Les précipitations auront alors un potentiel érosif plus fort, et une récurrence plus élevée, amenant à des événements érosifs plus intenses et plus fréquents ;
- une augmentation de la sévérité et de la fréquence des feux. Les milieux forestiers seront plus dégradés, et leur reconstitution sera limitée par la courte durée entre deux feux. Cela aura pour effet direct d'augmenter les périodes pendant lesquels les sols seront sensibles à l'érosion. De manière indirecte, cela diminuera l'efficacité des moyens mis en œuvre pour lutter contre l'érosion, tout en augmentant leur coût, car il sera nécessaire de réimplanter ces moyens de lutte plus fréquemment.

La préservation des sols et des milieux restera un enjeu majeur pour lequel nous sommes déjà bien outillés. Même si les contextes sont différents, les fondamentaux restent les mêmes. La formation et le partage de retours d'expérience, heureux ou malheureux, permettront de développer les compétences et de s'adapter aux changements.

Frédéric Darboux

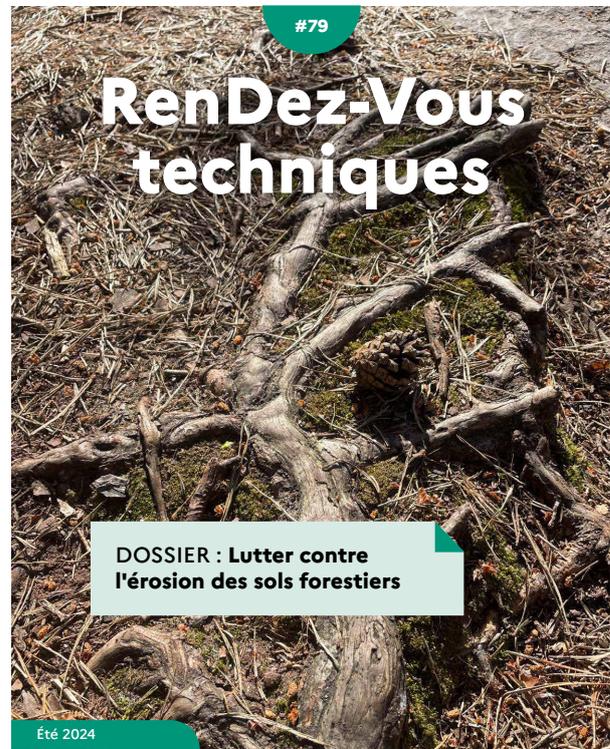
INRAE – Institut des Géosciences de l'Environnement

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Auvergne Rhône-Alpes

Arnaud Legout

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers



↑ **Figure 2.** Apprenez-en plus sur la lutte contre l'érosion des sols forestiers avec le Rendez-Vous techniques n° 79.

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Arias-Navarro C, Baritz R and Jones A editor(s) (2024) The state of soils in Europe. Publications Office of the European Union.
<https://data.europa.eu/doi/10.2760/7007291,JRC137600>.



Stratégie de développement du câble aérien à l'ONF

Pour protéger les sols du tassement, une très bonne solution est le débardage par câble-mât. Le marché national « câble » lancé par l'ONF de 2023 à 2024 a permis de développer ce système d'exploitation en plaine et en moyenne montagne où les prestataires câblistes sont très peu nombreux. Didier Pischedda, expert national en exploitation forestière et logistique à l'ONF, dresse dans cet article un premier bilan de ce marché national.



Exploitation par câble des chênes pour Notre-Dame de Paris en Forêt Domaniale de Bercé - Mars 2022 (D. Pischedda)

Introduction

Des chênes de valeur ont bénéficié d'une gestion sylvicole durable sur plusieurs générations de forestiers. Aujourd'hui, les pluies de plus en plus abondantes en période hivernale ne permettent de mobiliser les bois que sur de courtes périodes, lorsque les sols sont les plus portants. Cela pose des problèmes de continuité dans l'approvisionnement de la filière bois, mais aussi d'organisation dans les unités territoriales ; les suivis d'exploitations, cubages, classements et réceptions se concentrant dans le temps. L'exploitation doit se faire alors que les arbres sont en feuilles, ce qui n'est pas optimal pour les intervenants et qui rend plus difficile le contrôle de l'export des menus bois lors de l'exploitation mécanisée des houppiers.

Pourtant, une méthode de débardage permet de réaliser les exploitations même lorsque les sols sont trop humides pour supporter la circulation d'un tracteur de débardage. Il s'agit du débardage par câble aérien.

Mais les câblistes français sont peu nombreux et concentrés historiquement dans les massifs montagneux : Alpes, et un peu Pyrénées ou Vosges. Pour éviter une perte de compétence, et au vu des volumes à mobiliser par câble sur le territoire pour le chêne, mais aussi pour les autres essences (encadré 1), l'ONF a décidé de soutenir les prestataires câblistes en lançant en mars 2023 un marché national câble aérien.

Encadré 1 : Un besoin important d'exploitations par câble

Le débardage par câble aérien étant peu connu en plaine, il était nécessaire d'accompagner les équipes de terrain pour déterminer si les parcelles proposées étaient bien réalisables par câble aérien d'un point de vue technique et économique, mais aussi pour faciliter la mise en œuvre des chantiers. C'est ainsi qu'un poste de chargé de mission câble national a été mis en place. Cela a permis l'expertise de près de 210 000 m³, dont 58 % sont situés en forêt domaniale, avec un volume à peu près équivalent en plaine et en montagne. Environ 10 % de ces volumes ne se sont pas révélés réalisables techniquement ou économiquement. Il apparaît que la **ressource annuelle potentielle à ce jour** sur tout le territoire en forêts publiques **se situe entre 95 000 et 139 000 m³**, soit du travail pour 10 à 15 câblistes. C'est déjà plus que le nombre actuel de câblistes. Le nombre d'expertises étant resté limité, cette ressource potentielle est une estimation basse de la réalité.



↑ **Figure 1.** Localisation des chantiers réalisés au câble aérien en deux ans. Les feuillus sont en vert clair et les résineux en vert foncé.

Premier bilan des deux années du marché national câble

Dans un premier temps, six câblistes ont été retenus pour le marché national, dont deux étaient inactifs. Deux nouveaux arrivants ont intégré le vivier en 2024 : des ETF avec plusieurs équipes de bûcheronnage mécanisé qui se sont diversifiées en investissant dans un câble-mât.

La capacité de production de l'ensemble des titulaires actifs est d'environ 50 à 55 000 m³/an et ne couvre ainsi pas encore le potentiel identifié. L'accord cadre étant à marchés subséquents, tous les titulaires ont reçu l'expertise technique (plan de câblage) et le cahier des charges bois façonnés de chaque chantier. Le choix du titulaire s'est ensuite fait sur l'offre de prix, ses capacités techniques et son délai de réalisation. Selon les cas, les délais étaient fixés en fonction des dates des ventes publiques de bois façonnés ou en fonction des objectifs de livraisons vers des contrats d'approvisionnement.

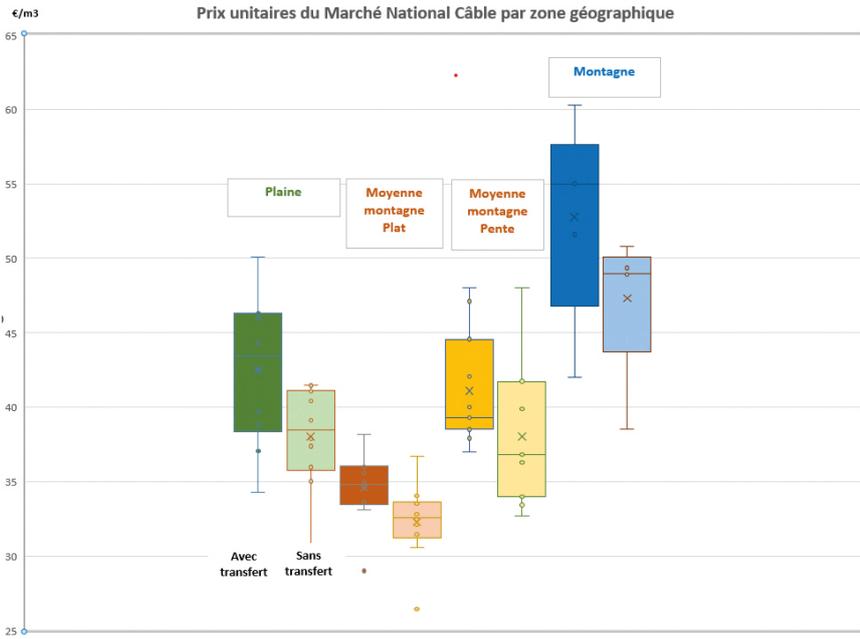
Le marché national a permis de lancer 74 chantiers, répartis à la fois en montagne et en plaine, pour mobiliser des feuillus ou des résineux (figure 1). Les zones sans chantier ne sont pas nécessairement sans ressources, bien au contraire, mais il n'est pas possible de démarrer cette activité partout au même rythme.

En novembre 2024, à la fin du marché national, 89 562 m³ ont été proposés dans le cadre du marché. En janvier 2025, quelques 78 372 m³ sont mobilisés, vendus ou encore en cours d'exploitation. Les consultations pour les 11 190 m³ restants sont restées infructueuses par manque de disponibilité des ETF.

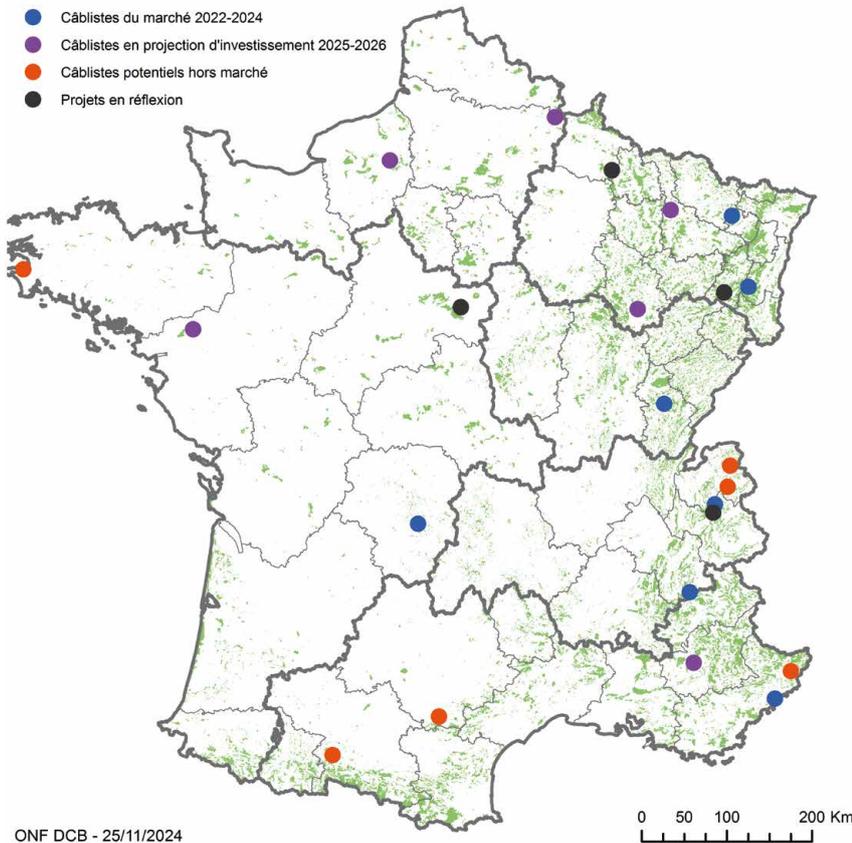
Le prix moyen d'exploitation est de 40 €/m³ (prestation complète : abattage, débardage par câble). En comparaison, en système terrestre classique, les prix sont autour de 27-29 €/m³.

Il y a donc bien une différence moyenne de 10 à 12 €/m³, mais elle n'est pas du simple au double comme le craignaient ceux qui avaient en tête les seuls prix des exploitations en montagne. Cette différence est à mettre en relation avec les services rendus pour les sols forestiers et le fait de pouvoir mobiliser le bois en plaine l'hiver et répondre ainsi aux besoins de la filière bois.

L'analyse des bordereaux de prix unitaire des 74 chantiers montre la forte part du coût de transfert des machines et des personnels sur les chantiers. On observe également que les coûts d'exploitation sont bien plus bas en plaine et en moyenne montagne qu'en montagne, qui est la zone de travail traditionnelle des câblistes, mais où les conditions de débardage sont plus difficiles (figure 2).



↑ **Figure 2.** Variation des prix (en euros par m³) incluant ou non le transfert, selon le contexte : plaine en vert, moyenne montagne plat en orange, moyenne montagne avec pente en jaune et montagne en bleu. Pour chaque contexte, la boîte à moustache de gauche inclut le coût de transfert des machines sur les chantiers et celle de droite ne l'inclut pas.



ONF DCB - 25/11/2024

↑ **Figure 3.** Localisation des câblistes en activité et des ETF en projection d'investissement

Les chantiers de résineux en moyenne montagne ou en plaine sont très productifs et font baisser le prix moyen d'exploitation de 10 % (autour des 35 €/m³).

Les chantiers de plaine feuillus font, à l'inverse, augmenter le prix moyen de 10 %. Cela est dû à des coûts de transfert élevés (souvent 5 à 7 €/m³, les câblistes venant de loin) et à un tarif de sous-traitance de l'abattage feuillu par des bûcherons locaux plus élevé (4 € de plus qu'en résineux).

Et les câblistes ?

La mise en place d'un marché câble par l'ONF a permis d'augmenter le volume moyen produit par câbliste à 10000 m³/an, ce qui conforte la pérennisation de ces entreprises. De plus, d'autres ETF, pratiquement toutes situées en plaine, commencent à s'intéresser à ce mode d'exploitation (figure 3). Cinq nouvelles entreprises sont en train de monter des dossiers d'investissement dans des câbles-mât pour 2025 et cinq autres lancent une réflexion sur les opportunités de développement de débarquement par câble-mât au sein de leur entreprise.

Par ailleurs, l'ONF a travaillé avec les câblistes pour leur permettre de se structurer et de relancer les formations d'opérateur câbliste et de chef d'équipe qui sont actuellement absentes des centres de formation et des référentiels de compétences métiers. Cela a été rendu possible grâce à l'appel à projet de l'ADEME Exploitation forestière et Sylviculture Performantes et Résilientes 2023 et 2024.

Ces démarches ont aussi été présentées à France Bois Forêt, à la FNCOFOR et à la FNB.

Et pour la suite ?

Vu les retours d'expériences de ces deux dernières années, il est opportun de continuer la coordination nationale pour le développement du câble aérien. Un nouveau marché a donc été approuvé pour la période 2025-2029.

Pour cette période, les efforts collectifs sont à concentrer sur trois grands axes :

▲ Développer une offre de câblistes par massif ou par région pour diminuer les coûts, notamment celui des transferts

Cela passe par un travail interne pour inciter les services de terrain à identifier et faire remonter les parcelles à fort risque de suspension de chantier en cas de pluie. L'objectif est d'assurer l'activité des nouveaux câblistes sur un rayon d'environ 150 km autour de leur base.

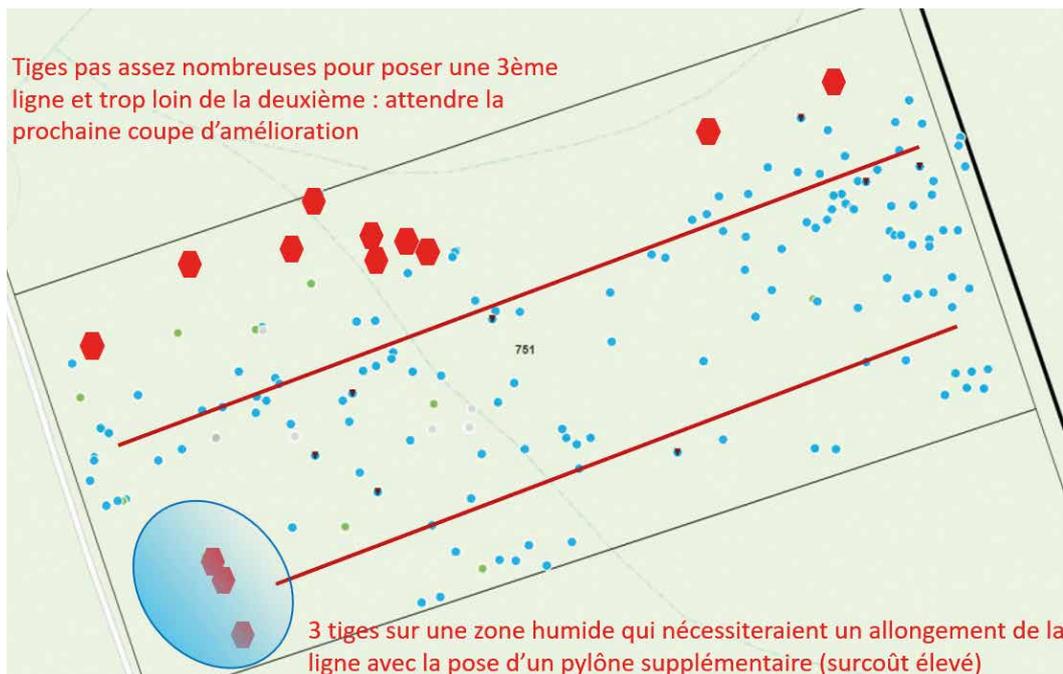
▲ Mobiliser en priorité les bois de qualité sur sols sensibles

Ceci nous permet de répondre aux effets du changement climatique (notamment via l'augmentation des précipitations hivernales qui suspendent de plus en plus souvent les chantiers) pour valoriser les bois de haute valeur ajoutée issus d'une sylviculture centenaire. Nous avons préféré, dans un premier temps, rapprocher les enjeux de protection des sols et de valorisation des bois pour faciliter l'adoption de ce système. Bien évidemment, toutes les autres essences désignées dans ces parcelles sont mobilisées. Avec le développement d'une meilleure capacité de production des câblistes, nous pourrions viser toutes les essences.

▲ Communiquer sur le lien à faire entre la sylviculture et le système de mobilisation par câble aérien, notamment en coupe d'amélioration

Le débardage par câble peut être intégré à une sylviculture classique. D'ailleurs, en plaine, les gestionnaires ne connaissent pas toujours le mode de débardage au moment de la désignation des arbres, car il dépendra de la météo. Mais il est important de connaître les contraintes de l'exploitation par câble pour comprendre où sont les nuances lorsque le système d'exploitation change. Le prélèvement par hectare ou la désignation ne changent pas fondamentalement, mais les lignes de câble sont mises en place pour optimiser l'indice de prélèvement câble. Cela peut impliquer de décaler à la prochaine coupe l'exploitation des quelques tiges éloignées, comme sur l'exemple de la figure 4.

Bien sûr, il n'est pas question de faire du câble aérien partout à la place du système terrestre. Il s'agit de développer ce système complémentaire pour nous permettre d'utiliser chaque système à disposition pour de bonnes raisons, au bon endroit et au bon moment. La mise en place d'une démarche similaire est en cours pour le débardage au cheval (encadré 2).



← **Figure 4.** Exemple d'adaptation des tiges prélevées pour une optimisation de l'exploitation par câble. Les lignes de câble sont représentées en marron. Les points sont les tiges désignées lors du martelage et les hexagones rouges sont les tiges qui ne seront pas prélevées.

Encadré 2 : Travail en cours pour renforcer les entreprises de débardage au cheval



↑ **Figure 5.** Débardage mixte tracteur-cheval
(photo : A. Thibaudet)

Un autre système d'exploitation alternatif intéresse l'ONF pour répondre aux enjeux de protection des sols, de réduction des émissions de carbone, d'accès aux parcelles en hiver et d'acceptabilité des coupes par le public : le débardage au cheval. Les entreprises sont peu nombreuses et l'ONF a peu de références en termes de prix et de qualité des exploitations. Alors, sur l'exemple de la démarche mise en place avec l'exploitation par câble mât, l'ONF a lancé un plan d'action « débardage par traction animale » en collaboration avec la société française des équipés de travail et France énergie animale.

Les premières étapes consistent à définir comment accompagner les entreprises de traction animale, comment les former au débardage et comment leur donner de la visibilité sur les chantiers potentiels. La réflexion n'en est qu'à ses débuts, mais un réseau de référents territoriaux « traction animale » émerge progressivement en DT Auvergne Rhône-Alpes, Bourgogne Franche-Comté et Grand-Est et une première consultation des entreprises a été lancée en DT AuRA. Le réseau des référents recherche des retours d'expériences sur des chantiers réalisés ces dernières années, ainsi que de nouvelles recrues en DT GE, SN, COA et MM.

Témoignage de Michel Romanski, Responsable de l'Unité territoriale de Chaux (39)

En Forêt Domaniale de Chaux, les exploitations de chênes sont réalisées en bois façonnés depuis plus de 15 ans et ont lieu du 15/08 au 31/10, période pendant laquelle les sols forestiers sont qualifiés de secs, à 15 ou 20 jours près. Mais cantonner les exploitations à cette période pose d'autres problèmes. L'exploitation est faite en feuilles, ce qui n'est pas optimal pour la sécurité des intervenants ni pour le contrôle des exports de rémanents. Tous les volumes sont mis bord de route pendant une courte période, ce qui entraîne une forte charge de travail pour le suivi des exploitations et peut donner une impression d'exploitation trop intensive de la forêt. De plus, en cas de forte chaleur, les bois bord de route risquent de se dégrader.

L'exploitation par câble aérien permet d'étendre la période d'exploitation et d'éviter beaucoup de ces désagréments. C'est pourquoi le volume de bois exploité par câble mât est en constante augmentation sur la forêt de Chaux. Nous avons commencé modestement en 2020-2021 avec 1430 m³, nous avons réalisé 3150 m³ l'année dernière et prévoyons 5025 m³ pour cette année. Dans un premier temps, nous avons concentré ces exploitations sur les coupes de régénération afin de profiter du câble pour sortir les grumes, mais aussi les houppiers, sans perturber le sol. Sur des saisons comme celle de 2023-2024, où la vidange des bois au tracteur n'a été possible que durant 30 jours cumulés en septembre et octobre, le câble devient une véritable solution de repli.

Didier Pischedda

ONF – Expert national en exploitation forestière et logistique

Charline Henry

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation DT Auvergne Rhône-Alpes



Définition de la fertilité chimique des écosystèmes forestiers et rôle de la gestion dans sa préservation

Lorsque l'on parle de la préservation des sols, les forestiers pensent très vite à la problématique du tassement des sols. Mais la fertilité chimique est aussi un élément primordial pour la productivité des peuplements, et celle-ci peut aussi être impactée par la gestion forestière. Cet article revient sur le concept de fertilité chimique, sur l'importance des cycles biogéochimiques et sur l'impact des choix de gestion sur ces processus.

La fertilité peut être subdivisée en 3 composantes, étroitement liées : physique (profondeur de sol, pierrosité...), biologique (présence de certains organismes comme les vers de terre) et chimique (teneur en nutriments disponibles pour les plantes), le tout en interaction avec des activités humaines (agriculture, pollution atmosphérique...). Cet article s'intéressera uniquement à la fertilité chimique, qui est un des piliers de la durabilité des écosystèmes forestiers et des services qu'ils procurent à la société (production de bois, régulation du climat, réservoir de biodiversité, accueil du public, etc.). Dans le contexte des changements globaux, le risque de dégradation de la fertilité chimique est accru et il est important d'évaluer au plus juste cette fertilité et son évolution temporelle pour assurer une gestion durable des forêts. Cet article vise à préciser la définition de la fertilité chimique pour les écosystèmes forestiers et à rappeler l'impact des choix de gestion sur cette fertilité.

La fertilité chimique des écosystèmes forestiers : un réservoir dans le sol, mais aussi du recyclage par les arbres !

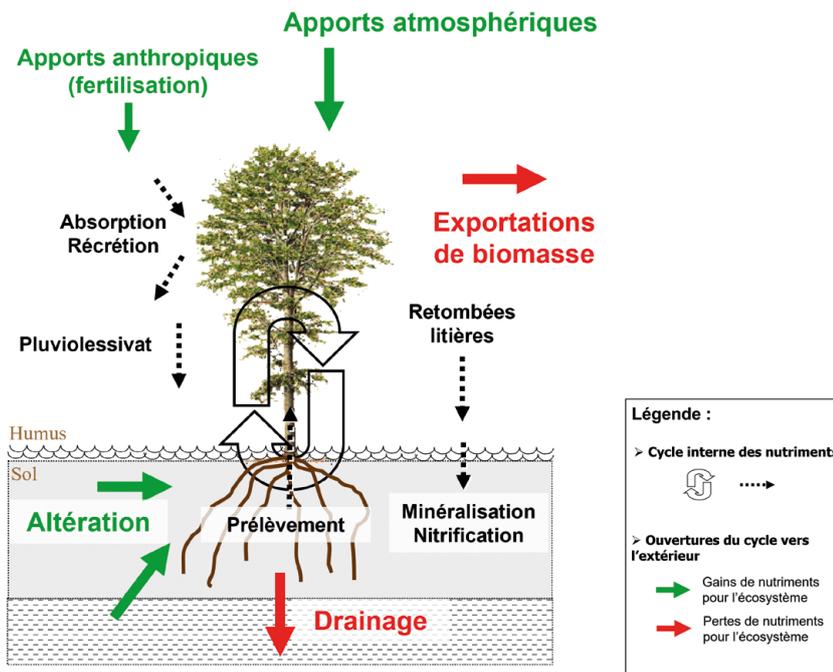
Les cycles biogéochimiques

Les sols forestiers sont généralement pauvres chimiquement, parfois très pauvres, colonisés par des plantes pérennes adaptées à ce contexte dans un ensemble de processus décrits sous le vocable de cycles biogéochimiques des éléments nutritifs.

En simplifiant, les cycles biogéochimiques correspondent à la circulation des éléments nutritifs dans l'écosystème forestier, ceux-ci étant en partie recyclés par la plante : en effet l'arbre prélève des éléments dans le sol, une partie est immobilisée dans l'arbre pour constituer la biomasse, mais une autre partie retourne au sol sous forme liquide (récrétion) ou solide (chute des feuilles, de branches...) (voir figure 1).

Ce recyclage est appelé « cycle interne » des éléments et il est ouvert vers l'extérieur, quatre grands flux venant alimenter ou réduire les stocks d'éléments présents dans l'écosystème (voir figure 1) :

- Les apports atmosphériques : ils apportent à l'écosystème des quantités non négligeables de nutriments, sous forme de dépôts humides (contenus dans la pluie, la neige), de dépôts secs (sous forme de particules et gaz) ou de dépôts occultes (contenus dans le brouillard et les aérosols).
- Les apports par altération des minéraux du sol : l'altération des minéraux du sol permet la mise à disposition de nutriments qui étaient jusque-là inaccessibles pour les arbres. Les apports par altération constituent donc un gain de nutriments pour l'écosystème.
- Les pertes par drainage : la migration des eaux dans le sol entraîne en profondeur des nutriments, sous forme soluble ou en suspension. Si l'on considère que les remontées de nutriments par capillarité sont négligeables, le flux de nutriments drainés au-delà de la zone classiquement explorée par les racines (0-120 cm) est alors considéré comme une perte pour l'écosystème.
- Les pertes liées à la récolte de biomasse : dans les écosystèmes forestiers exploités par l'homme, le prélèvement périodique de la biomasse arborée et donc de nutriments contenus dans cette biomasse constitue une perte pour l'écosystème.



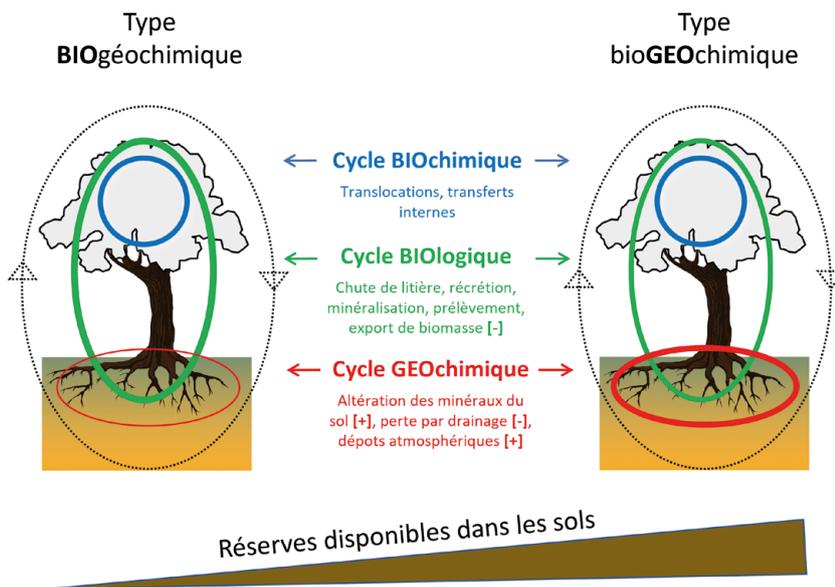
↑ **Figure 1.** Circulation des nutriments dans l'écosystème forestier : cycle interne des nutriments et ouvertures du cycle vers l'extérieur.

Le recyclage en forêt, un pilier de la fertilité et de la nutrition

La compilation de données de réserves et flux d'éléments circulant dans l'écosystème forestier (approches décrites dans le prochain article de ce dossier), sur plusieurs sites du réseau Renecofor et sur des sites ateliers dédiés à l'étude des cycles biogéochimiques, a permis de préciser le concept de fertilité chimique pour les écosystèmes forestiers.

Ces travaux démontrent que la fertilité chimique des écosystèmes forestiers ne doit pas uniquement se limiter au réservoir de nutriments disponibles dans les sols, mais elle doit également tenir compte de la circulation d'éléments et du recyclage propre aux cycles biogéochimiques. Une typologie de fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers a ainsi été formalisée pour rendre compte de l'importance des différentes composantes des cycles (BIOlogique ou GEOchimique) dans la fertilité chimique des écosystèmes forestiers (figure 2) et connaître ainsi son origine.

Lorsque la composante GEOchimique du cycle est prépondérante (apports par altération des minéraux du sol et/ou apports atmosphériques importants), celle-ci apporte suffisamment de nutriments au système sol-plante pour assurer la croissance des arbres, le réservoir sol participant ici grandement à la nutrition du peuplement. À l'inverse, lorsque la composante GEOchimique du cycle n'apporte que peu de nutriments au système sol-plante, les composantes BIOlogique (restitutions par les litières, récréation...) et/ou BIOchimique (transferts internes à la plante) des cycles deviennent prépondérantes dans la nutrition du peuplement. Le concept de « réservoir » n'est alors pas suffisant pour caractériser la fertilité



↑ **Figure 2.** Composantes des cycles biogéochimiques des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers et principaux flux associés. Les signes [+] et [-] symbolisent respectivement des flux entrant ou sortant de l'écosystème.

chimique dans ces écosystèmes et l'importance du recyclage des éléments minéraux est d'autant plus grande que la réserve en nutriments dans les sols est faible. Il est alors primordial pour ces écosystèmes de type BIO d'adapter les pratiques sylvicoles (longueur des révolutions, compartiments de biomasse récoltés, méthodes de récolte et de traitement des rémanents) aux capacités de l'écosystème, en limitant notamment les exportations de biomasses.

Cette typologie de fonctionnement BIO-GEO est entre autres basée sur la connaissance des flux de nutriments entrant dans l'écosystème (dépôts et altération) et des réserves disponibles dans les sols. La connaissance des flux entrants requiert des suivis lourds et il n'existe à ce jour pas d'indicateur facilement mesurable qui rende compte des flux d'entrées. L'utilisation des réserves disponibles seules permet alors en première approximation d'évaluer le fonctionnement de l'écosystème et sa fertilité chimique. Basé sur ce concept, un indicateur d'évaluation de la fertilité chimique et de sensibilité des sols à l'exportation des rémanents d'exploitation a pu être développé.

Impact des choix de gestion sur la fertilité chimique des sols forestiers

Le maintien de la fertilité en forêt n'est pas une préoccupation récente, mais il convient encore plus aujourd'hui dans un contexte de changements globaux d'adapter les pratiques sylvicoles aux capacités des écosystèmes. Le gestionnaire peut intervenir sur de nombreuses variables pour permettre l'utilisation durable de la capacité à produire de l'écosystème, en jouant notamment sur la longueur des révolutions, les compartiments de biomasse récoltés ou encore les méthodes de récoltes et de traitement des rémanents. Parmi les termes du bilan de fertilité, les pertes liées à l'exportation de biomasse constituent le terme le plus facilement modulable à courte échéance et des outils basés sur l'évaluation de la fertilité chimique sont à la disposition du gestionnaire pour l'aider à adapter le prélèvement de biomasse aux capacités des sols et de l'écosystème. Quelques recommandations d'ordre général visant au maintien de la fertilité chimique sont rappelées ci-après.

■ Type de peuplements

- Choisir des essences adaptées à la station apporte une garantie pour optimiser durablement les fonctions de l'écosystème, mettant les peuplements à l'abri de bon nombre de contraintes ;
- favoriser les mélanges gérables d'essences, de façon à maintenir une biodiversité fonctionnelle active dans l'écosystème (biodiversité ayant un impact positif sur le fonctionnement et la durabilité de l'écosystème). En raison des difficultés de gestion des peuplements mélangés (vitesse de croissance des essences très différente...), il sera préférable de se référer à des pratiques validées ;
- privilégier une mosaïque de peuplements, où plusieurs classes d'âge sont représentées, ce qui permet d'assurer une certaine stabilité et continuité dans le temps et limite les perturbations brutales des cycles biogéochimiques à l'échelle de la parcelle de gestion et les potentielles pertes de fertilité associées.

■ Gestion des coupes

- Pratiquer des transitions progressives entre les révolutions forestières et préserver au maximum une couverture végétale au sol (strate herbacée, régénération bien établie) pendant ces transitions ;
- récolter les arbres à un âge suffisamment avancé : les stades initiaux de la vie de peuplements pérennes sont les moins efficaces en termes d'utilisation des ressources minérales pour produire la biomasse (tissus jeunes dominants, recyclage interne à la plante limité, forte allocation des ressources vers le houppier...);
- raisonner la récolte et le traitement des rémanents : les rémanents d'exploitation (menus bois, branches, feuilles, souches) représentent une quantité de biomasse, de carbone et de nutriments dont la minéralisation lente profitera au sol et aux peuplements futurs. L'exportation des résidus de récolte en plus du tronc conduit généralement à des quantités réduites d'éléments nutritifs totaux et disponibles dans les sols, à l'acidification des sols et à une diminution de la fertilité chimique. Pour les sols pauvres chimiquement, la capacité de renouvellement de ces éléments est faible et ces pratiques acidifiantes sont donc fortement déconseillées. Pour les autres sols, elles sont à adapter en veillant à ne pas dépasser la capacité d'auto-restauration du système (Cf. guide GERBOISE) ;
- répartir les rémanents issus d'une éclaircie ou d'une coupe de régénération de façon homogène sur l'ensemble de la parcelle, afin d'éviter de concentrer (comme le fait l'andainage par exemple) les éléments nutritifs retournant au sol sur des surfaces réduites. Éviter les décapages à la lame/godet qui entraînent une perte de fertilité importante si l'humus ou l'horizon A sont transférés dans l'andain ;
- raisonner la méthode de récolte pour limiter la dégradation physique des sols.

Renouellent des peuplements

- Régénérer naturellement lorsque c'est possible, pour assurer la transition entre un état boisé par des arbres matures et un sol couvert par des jeunes plants, afin de limiter les pertes de fertilité chimique ;
- adapter la préparation du site : il est souvent inutile d'intervenir sur la surface totale de la parcelle pour faciliter une plantation éventuelle, en plein ou en regarni. Compte tenu des inconvénients et du coût du nettoyage, du broyage et du travail du sol, ces opérations peuvent être limitées aux zones où seront positionnés les plants. Éviter autant que possible le travail du sol, en le limitant aux zones où des contraintes avérées doivent être levées.

Ce qu'il faut retenir

La fertilité chimique de l'écosystème forestier repose donc sur les réserves du sol, mais aussi sur le recyclage biologique des nutriments, et ce recyclage est d'autant plus important que les réserves de nutriments à disposition dans le sol sont faibles. La gestion joue un rôle crucial dans le fonctionnement du cycle biologique et le gestionnaire peut modifier tout ou partie de ce cycle en fonction des choix qu'il fera. Parmi les leviers possibles permettant de préserver la fertilité chimique, l'export supplémentaire de biomasse doit être raisonné et des outils opérationnels sont à la disposition du gestionnaire (voir prochain article de ce dossier). Il est également bon de rappeler que la fertilité ne se limite pas à la composante chimique traitée dans cet article, mais elle intègre également des composantes physique (profondeur de sol, réserve en eau...) et biologique (présence de certains organismes comme les vers de terre...) qu'il faut également veiller à préserver dans le cadre d'une gestion durable.

Arnaud Legout

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Gregory van der Heijden

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation DT Auvergne Rhône-Alpes

BIBLIOGRAPHIE

• 1. Landmann G, Augusto L, Pousse N, Gosselin M, Cacot E, Deleuze C, Bilger I, Amm A, Bilot N, Boulanger V, Leblanc M, Legout A, Pitocchi S, Renaud JP, Richter C, Saint-Andre L, Schrepfer L, Ulrich E (2018) Recommandations pour une récolte

durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. Paris : ECOFOR, Angers : ADEME, 50 p.



Comment évaluer la fertilité chimique en forêt ?

Nous avons vu l'importance de la fertilité chimique pour les sols forestiers dans l'article précédent. Cet article-ci présente les méthodes pour évaluer cette fertilité chimique, que ce soit dans le monde de la recherche où les protocoles mis en œuvre peuvent être lourds, mais aussi en gestion.

Cet article vise à présenter les approches permettant d'évaluer la fertilité chimique en milieu forestier, depuis les diagnostics poussés conduits en recherche jusqu'aux outils opérationnels à disposition du gestionnaire. Il est possible d'étudier et d'évaluer la fertilité chimique selon différentes approches, centrées soit sur l'arbre, soit sur le sol.

Les approches centrées sur l'arbre consistent à utiliser des paramètres liés au peuplement pour évaluer la fertilité de la station. Parmi les indicateurs utilisés, nous pouvons par exemple citer la hauteur dominante d'un peuplement à un âge donné. Ces méthodes permettent d'appréhender la fertilité globale d'un écosystème, en intégrant ses trois composantes (chimique, physique, biologique), mais également les facteurs climatiques et anthropiques (gestion, climat de pollution...) pouvant influencer la croissance. Cette approche est très intégrative, mais elle ne permet pas d'isoler et d'évaluer facilement le rôle du sol et de la fertilité chimique dans la croissance des peuplements : nous ne nous attarderons donc pas sur cette approche dans la suite de l'article.

Les approches centrées sur le sol sont nombreuses, certaines étant plutôt réservées à la recherche, d'autres s'adressant aux gestionnaires. Les approches utilisées en recherche sont souvent difficiles à mettre en œuvre et demandent des suivis longs et lourds, mais elles permettent d'acquérir au fil du temps le socle de connaissances nécessaire au développement d'indicateurs opérationnels utilisables en gestion. Nous proposons dans la suite de l'article de détailler dans un premier temps les approches utilisées en recherche, puis de récapituler les outils utilisables par le gestionnaire.

Approches mises en œuvre en recherche

Nous détaillons ci-après les approches d'évaluation de la fertilité chimique, plutôt réservées à la recherche, et classées par ordre croissant de difficulté de mise en œuvre.

▲ Evaluation des réserves d'éléments dans les sols et leurs évolutions

L'évaluation des réserves de nutriments disponibles dans le sol peut être réalisée en échantillonnant le sol d'une parcelle à différentes profondeurs, en préparant et analysant ces échantillons au laboratoire puis en calculant les réserves d'éléments potentiellement disponibles pour l'arbre dans chaque tranche de sols.



↑ **Figure 1.** Carotte de sol prélevée à la tarière « racinaire », qui permet la collecte d'échantillons de sol non remaniés de 15 cm d'épaisseur

En agronomie et en foresterie, on considère généralement les réserves en azote total, en phosphore assimilable (phosphore susceptible d'être prélevé par la plante) et en cations nutritifs « échangeables » (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) (cations retenus sur la phase solide et susceptibles d'être prélevés par la plante). Des travaux récents montrent cependant que ces indicateurs ne rendent pas forcément bien compte du réservoir réellement disponible pour les plantes, notamment pour les cations nutritifs et des recherches sont en cours pour améliorer cette quantification (encadré 1).

Encadré 1 : Quelles ressources réellement disponibles pour les plantes dans les sols ?

Les ressources disponibles pour les plantes dans les sols sont généralement évaluées au travers d'analyses de sols qui permettent par exemple de quantifier le phosphore « assimilable » et les cations nutritifs « échangeables » (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}). Ces analyses dites « conventionnelles » font appel à des procédés et extractions chimiques, mais qui ne correspondent pas nécessairement aux mécanismes mis en œuvre par les plantes pour extraire les nutriments du sol.

Une méthode innovante permettant de mesurer plus fidèlement les réserves biodisponibles (disponibles pour la plante) présentes dans les sols et faisant appel à la dilution isotopique a été mise au point. Cette méthode permet le dosage d'un élément, en déterminant la composition isotopique d'un échantillon après addition d'une quantité connue d'un isotope stable. Elle a permis de mettre en évidence que les réserves biodisponibles sont constituées des réservoirs de Ca, Mg et K « échangeables », mais aussi d'autres réservoirs : les réserves biodisponibles sont alors dans beaucoup de contextes supérieures aux réservoirs échangeables. Cette réserve supplémentaire, non prise en compte par les analyses de sol conventionnelles, pourrait donc accroître la fertilité chimique et contribuer à la nutrition des peuplements. Des recherches sont en cours pour simplifier cette méthode innovante et pour faire le lien avec les réserves 'échangeables' mesurées conventionnellement.

Est-ce que cela remet en cause l'utilisation des réserves « échangeables » pour évaluer la fertilité chimique de l'écosystème ? Pour l'instant, les réserves « échangeables » sont encore utilisées et nous sous-estimons donc probablement dans une majorité des cas la fertilité chimique de l'écosystème avec cette méthode. Cela revient à appliquer une marge de précaution, qui ne peut être que bénéfique pour la préservation de la fertilité chimique de l'écosystème. Cependant, les réserves 'échangeables' sont parfois supérieures aux réserves biodisponibles et les recherches futures devront préciser les écosystèmes concernés pour mieux les préserver.

Les valeurs obtenues pour les réserves peuvent être comparées à des normes pour évaluer le niveau de fertilité chimique de la parcelle. Pour évaluer l'évolution temporelle de la fertilité chimique d'une parcelle, il faudra rééchantillonner le sol à une nouvelle date suffisamment espacée dans le temps de la première pour que la variabilité temporelle soit supérieure à la variabilité spatiale (généralement 10 ans minimum).

■ Suivi d'indicateurs renseignant sur la fertilité chimique

Un indicateur est un paramètre qui renseigne indirectement sur l'état de fertilité chimique de l'écosystème. Il peut s'agir par exemple de la concentration foliaire en éléments chimiques (N, Ca, K, Mg, P...) ou de la qualité des eaux (ou solutions) de sol. La méthode des indicateurs permet un suivi plus régulier et dynamique de l'écosystème en comparaison de la méthode précédemment décrite, car le rééchantillonnage est réalisé à un pas de temps beaucoup plus rapproché : le pas de temps sera en général annuel pour les suivis foliaires, et mensuel jusqu'à trimestriel pour le suivi des solutions de sol.

Pour les échantillons foliaires, aucune installation in situ n'est nécessaire : les échantillons sont le plus souvent collectés à l'aide d'un fusil, préparés puis analysés pour les éléments d'intérêt. Les concentrations foliaires peuvent ensuite être comparées à des normes pour évaluer l'état nutritionnel des arbres et estimer le niveau de fertilité chimique de la parcelle. Les solutions de sol sont un bon indicateur de l'état de fonctionnement actuel du sol et de l'écosystème, mais cette approche est lourde à mettre en œuvre : l'installation de lysimètres (dispositif permettant de collecter de l'eau) dans la parcelle d'intérêt, les analyses chimiques régulières des échantillons collectés et l'interprétation des résultats en font une approche réservée à la recherche. Ces approches reposent sur des hypothèses de relations étroites entre indicateur et fertilité chimique ; cependant, ce lien n'est à ce jour pas démontré dans tous les contextes et il faut garder cela à l'esprit lorsque l'on utilise ces indicateurs.

■ Bilan de fertilité entrées-sorties

Dans les écosystèmes forestiers, les nutriments circulent entre le sol et la plante : une quantité de nutriments est prélevée par l'arbre dans la solution du sol, distribuée dans la biomasse arborée puis une partie peut retourner au sol via des restitutions solides (chute de litière, de branches...) ou liquides (récrétion) (voir le précédent article de ce dossier). Cette boucle de circulation au sein de l'écosystème présente des ouvertures vers l'extérieur et le bilan de fertilité s'intéresse aux flux d'entrées et de sorties constituant ces ouvertures. En conditions de relief modéré et en climat tempéré, le bilan de fertilité d'un écosystème forestier peut s'écrire :

$$\text{BILAN} = \text{Entrées} [\text{AA} + \text{A}] - \text{Sorties} [\text{EB} + \text{Dr}]$$

Avec : AA : Apports Atmosphériques, A : Apports par Altération des minéraux du sol, EB : Pertes liées à l'Exportation de Biomasse et Dr : Pertes par Drainage.

Ce bilan est calculé sur une période donnée (généralement 10 ans ou plus) et l'interprétation du résultat est la suivante :

- un bilan positif signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont supérieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriments assurant la nutrition du peuplement est donc en augmentation, la fertilité chimique n'est pas menacée et la durabilité de l'écosystème n'est pas remise en question.
- un bilan négatif signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont inférieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriments assurant la nutrition du peuplement est donc en diminution, la fertilité chimique est menacée et la durabilité de l'écosystème est remise en question. L'écosystème est en danger si aucun redressement n'est envisagé.

Cette approche présente l'avantage d'estimer l'évolution de la fertilité chimique sur le long terme et de bien comprendre le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème étudié ainsi que l'origine de la fertilité. Cette méthode est néanmoins très lourde à mettre en œuvre, car elle nécessite des instrumentations lourdes, des prélèvements et analyses chimiques réguliers (et ce pendant environ 10 ans ou plus) et les calculs des différents flux composants le bilan sont complexes. Cette approche, très riche d'informations, est réservée à la recherche et elle ne

peut pas être déployée dans beaucoup d'écosystèmes à l'échelle du territoire. Aujourd'hui, environ vingt sites en France métropolitaine permettent cette approche : quelques sites in natura FORET d'ANAEE France^a (Breuil-Chenue, Azerailles et Clermont en Argonne, Montiers), quelques dispositifs IN-SYLVA France^b (Réseau Douglas) ainsi que les placettes niveau III du réseau Renecofor.

Outils d'évaluation de la fertilité chimique à la disposition du gestionnaire

Après avoir balayé les différentes approches plutôt réservées à la recherche, nous nous intéresserons ici aux outils de diagnostic utilisables par le gestionnaire et qui visent principalement à évaluer la sensibilité des sols à l'export de biomasse.

La construction d'outils pour la gestion : un long processus en partie basé sur les résultats de la recherche

La typologie de fonctionnement BIO-GEO décrite dans l'article précédent met en effet en évidence qu'un sol avec peu de réserves peut connaître une productivité forte grâce au recyclage intense des éléments nutritifs et la gestion des exports est alors cruciale. Le projet « INSENSÉ »



↑ **Figure 2.** Allure d'une placette fortement instrumentée pour l'étude des flux de nutriments dans l'écosystème (site atelier de Breuil-Chenue, 58). Les gouttières permettent de collecter les « pluviolessivats » (eaux de pluie ayant traversé et interagit avec la canopée et qui atteignent le sol) et les colliers présents autour des troncs les « écoulements de troncs » (eaux de pluie ayant ruisselé sur les organes de la canopée, puis le long du tronc). Ces collecteurs sont reliés à des bidons de réception enterrés dans des fosses.

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^{1,2}. En se basant sur la typologie de fonctionnement BIO-GEO et en considérant que la couche de surface du sol est au cœur du recyclage d'origine biologique, l'écosystème forestier est alors considéré comme sensible à un export supplémentaire de biomasse (récolte des menus bois, du feuillage et/ou des souches) si la concentration en éléments nutritifs est faible dans les 10 premiers cm du sol. Des seuils de concentration pour cinq éléments nutritifs majeurs (calcium, magnésium, potassium, phosphore et azote) ont alors été établis pour cet indicateur scientifique, à partir de données expérimentales et de suivi de la nutrition des écosystèmes forestiers français. Cet indicateur scientifique (i.e. la concentration en éléments nutritifs de la couche 0-10 cm de profondeur) a ensuite été simplifié pour le rendre opérationnel, en le reliant à des paramètres accessibles sur le terrain³. Des clés de détermination permettant de prédire la sensibilité par élément nutritif ont alors été construites à partir d'une base de données nationale, en s'appuyant sur 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). L'agrégation des sensibilités individuelles par élément nutritif donne la sensibilité globale utilisée pour connaître le niveau de recommandation GERBOISE⁴ qui s'applique au site diagnostiqué (l'utilisateur peut également choisir de travailler avec les sensibilités individuelles par élément s'il le souhaite). Pour plus de détails, vous pouvez consulter le RDVT n°67-68 « Gestion durable des sols forestiers ».

■ L'outil For-Eval

Lors du projet « INSENSE », les besoins des gestionnaires ont été étudiés pour trouver le meilleur compromis entre fiabilité et accessibilité de l'indicateur de sensibilité à l'export des menus bois². Le développement d'une application pour smartphone a été jugé indispensable pour rendre plus accessible cet indicateur. Par conséquent, ces nouvelles connaissances ont été intégrées à l'application For-Eval (Forêt et Évaluations) qui a vocation à guider l'utilisateur dans la description du sol et réaliser un diagnostic instantané de sensibilité des sols, sans analyse de laboratoire, à

partir des informations renseignées depuis le terrain. Cette application est disponible gratuitement sur le Play store⁶. Plus de détail dans l'article « Outils d'aide à la décision pour la gestion durable des sols » de ce dossier.

Ce qu'il faut retenir

Comme nous l'avons déjà mentionné dans ce dossier, la fertilité chimique est un des piliers de la durabilité des écosystèmes forestiers et des services qu'ils procurent à la société (production de bois, régulation du climat, réservoir de biodiversité, accueil du public). Dans le contexte des changements globaux, le risque de dégradation de la fertilité chimique est accru et il est important d'évaluer au plus juste cette fertilité et d'adapter la gestion aux capacités des écosystèmes. Si cette capacité est dépassée, les nombreuses fonctions et services précédemment mentionnés peuvent être mis en danger, voire disparaître. Comme nous l'avons vu, des outils opérationnels sont aujourd'hui disponibles pour aider le gestionnaire à gérer durablement les sols et les forêts. Le mot d'ordre reste la préservation de la fertilité chimique, mais il arrive dans certains contextes qu'elle soit très fortement dégradée : le recours à l'amendement est alors une option pouvant permettre sa restauration et une amélioration globale du fonctionnement de l'écosystème, et par conséquent des fonctions qu'il assure.

La pratique de l'amendement consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium ou de magnésium, complété si besoin d'un apport de phosphore ou de potassium afin d'éviter des déséquilibres nutritionnels. Cette pratique curative peut également être appliquée à des fins préventives pour maintenir un niveau de fertilité souhaité. Il est cependant bon de préciser que la remédiation chimique est indissociable d'une politique raisonnée d'exportation des rémanents : l'apport d'amendement sur sol pauvre chimiquement à des fins de restauration de la fertilité ne doit pas inciter à réaliser des surexploitations de biomasse.

Arnaud Legout

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Gregory van der Heijden

INRAE – Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Noémie Pousse

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovation DT Auvergne Rhône-Alpes

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

- 1 : Cacot E (coord.) (2006). La récolte raisonnée des rémanents en forêt. ADEME - AFOCEL - IDF - UCFF - INRA, 36p.
- 2 : Augusto L, Pousse N, Legout A, Seynave I, Jabiol B, Levillain J (2018) INSENSE : Indicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. 262 p. <https://www.ademe.fr/insense-indicateurs-sensibilite-ecosystemes-forestiers-soumis-a-recolte-accrue-biomasse>.
- 3 : Durante S, Augusto L, Achat DL, 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*, 104, 512–523. doi :10.1016/j.ecolind.2019.05.035

- 4 : Landmann G, Augusto L, Pousse N, Gosselin M, Cacot E, Deleuze C, Bilger I, Amm A, Bilot N, Boulanger V, Leblanc M, Legout A, Pitocchi S, Renaud JP, Richter C, Saint-Andre L, Schrepfer L, Ulrich E (2018) Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. Paris : ECOFOR, Angers : ADEME, 50 p.

• a : <https://www.anaee-france.fr/service/experimentation-in-natura/foret/>

• b : <https://in-sylva-france.hub.inrae.fr/services/in-situ>

• c : <https://play.google.com/store/apps/details?id=fr.inrae.foreval&hl=fr&gl=US>



Effets du prélèvement des menus-bois sur la biodiversité et la fertilité des sols

La récolte des arbres entiers pour la production de bois-énergie s'est développée ces dernières années, entraînant une exportation accrue de biomasse hors des écosystèmes forestiers. Si cette pratique offre une valorisation économique aux interventions sylvicoles précoces, elle pose néanmoins des questions sur ses effets à long terme sur la fertilité chimique des sols et la biodiversité. Quels sont les enjeux liés à la récolte des menus-bois et quelles recommandations adopter pour une gestion durable des sols forestiers ?

Contexte

Le développement de la filière bois énergie a offert une opportunité de valoriser les produits des premières éclaircies, ouverture de cloisonnements ou relevés de couvert, opérations indispensables du point de vue sylvicole, mais difficilement commercialisables, particulièrement dans les peuplements feuillus. La mécanisation des exploitations forestières permet de réaliser ces interventions tout en commercialisant ces bois de petits diamètres. Ces pratiques de récolte mécanisée conduisent à prélever les arbres entiers et donc à exporter des compartiments des arbres jusqu'alors laissés en forêt. D'après une enquête menée par le FCBA en 2015, 83 % de la biomasse récoltée pour la production de plaquettes forestières était issue de houppiers et d'arbres exploités entiers.

Ces exploitations engendrent une exportation supplémentaire d'éléments minéraux par rapport à une récolte de la seule grume ce qui a des conséquences sur la fertilité et sur la biodiversité des sols forestiers. Les résidus d'exploitation, potentiel stock de bois mort, ont des rôles multiples dans l'écosystème : réservoir d'éléments minéraux et de matière organique, habitats et supports à une importante biodiversité forestière, protection physique du sol contre l'érosion et contre l'assèchement en surface surtout lors de fortes chaleurs.

Les gestionnaires forestiers se questionnent fréquemment sur les effets du prélèvement de ces résidus d'exploitation, aussi appelés rémanents. Mais précisons d'abord quelques définitions.

Les rémanents d'exploitation qualifient tous les résidus d'exploitation non commercialisés et laissés sur le parterre de coupe. Ce terme englobe :

- les branches de diamètre inférieur à 7 cm, appelées menus-bois (figure 1) ;
- les souches, extraites dans certains itinéraires d'exploitation ;
- les feuillages ;
- les chutes de découpe et bois coupés, mais non valorisables.

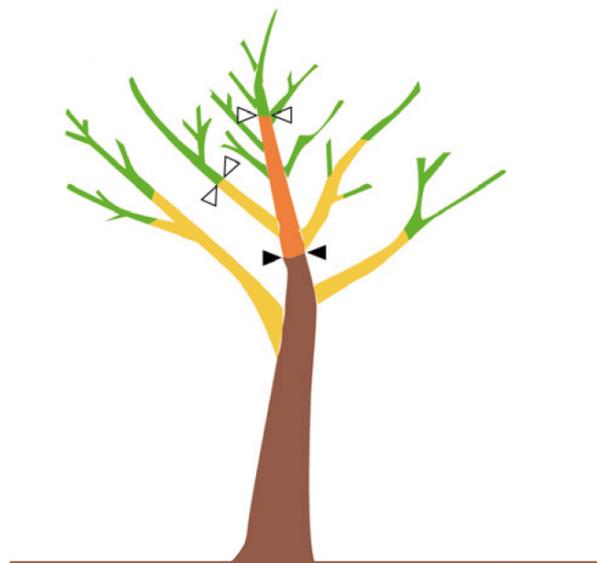
Lors d'une exploitation « bois fort », seules les surbilles sont valorisées en bois d'industrie ou bois énergie (BIBE), contrairement à une exploitation d'arbre entier pour laquelle la totalité du houppier est utilisée en BIBE (figure 1). Dans la large majorité de nos contextes, les récoltes d'arbres entiers concernent les menus-bois et les feuillages, nous ne traiterons donc pas des récoltes de souches.

Quels sont les effets de la récolte des menus-bois sur la fertilité des sols ?

La fertilité chimique d'un sol dépend des flux entrants (apports atmosphériques et altération de la roche) et des flux sortants (drainage et exportation de biomasse). La décomposition des feuilles et des branches tombées au sol restitue à l'écosystème les nutriments prélevés par les arbres. Le maintien de la fertilité chimique repose donc sur la quantité d'éléments chimiques exportée hors de l'écosystème.

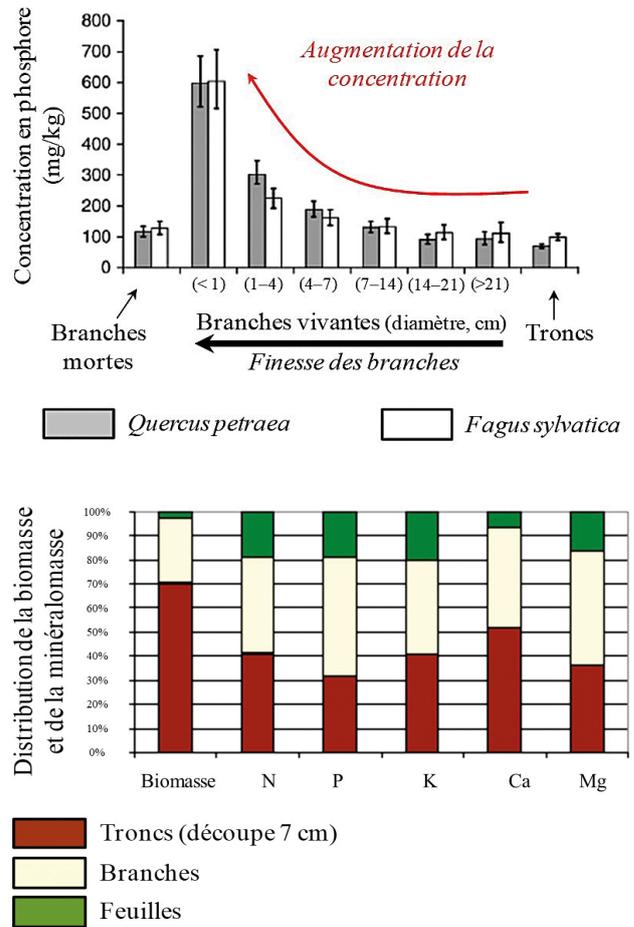
Or les menus-bois constituent une quantité importante de matière organique et sont riches en éléments chimiques : azote (N), phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg), calcium (Ca). Les feuilles et les aiguilles sont les compartiments les plus riches de l'arbre, jusqu'à 6 fois plus concentrées en éléments minéraux que le bois du tronc. Les branches sont d'autant plus concentrées en éléments minéraux que leur diamètre est faible (figure 2). Selon les essences, le houppier (feuillage + menus-bois) concentre 50 à 80 % de la quantité des 5 principaux éléments minéraux de l'arbre¹.

En pratique, les conséquences de la récolte des menus-bois dépendent donc de la part de menus-bois laissés au sol, de la richesse chimique initiale du sol, ainsi que de la fréquence de telles récoltes au cours de la vie du peuplement. Ces conséquences sont difficilement détectables, car les temps de réponse de l'écosystème s'étirent sur des décennies, tant au niveau de la croissance des peuplements que des processus biogéochimiques.



- ▷ Découpe bois fort
- ▶ Découpe de qualité bois d'œuvre
- Cime et petites branches - Menu bois
- Surbilles de branches - Bois industries/Bois énergie (BIBE)
- Autres surbilles de tiges - Bois industries/Bois énergie (BIBE)
- Bille de pied et surbilles de tiges - Bois d'œuvre (BO)

↑ **Figure 1.** Schéma des différents compartiments de l'arbre et de leurs débouchés (source FCBA)



↑ **Figure 2.** En haut : concentration du phosphore dans le bois en fonction du diamètre (exemple des feuillus) ; en bas : répartition de la biomasse et de la quantité des principaux éléments minéraux dans les différents compartiments chez les feuillus¹.

Mais récolter les menus-bois peut induire un appauvrissement chimique du sol puisqu'une partie des stocks d'éléments disponibles et de matière organique se retrouve réduite. Les processus de dégradation des matières organiques et l'équilibre biogéochimique peuvent alors être altérés. Le risque d'appauvrissement chimique est d'autant plus présent que le sol est pauvre chimiquement (notamment les sols acides, pauvres en éléments biodisponibles). Ainsi, les sols sableux sont particulièrement sensibles aux exportations des menus-bois. Ces effets sur la fertilité du sol peuvent alors affecter la nutrition des arbres et la productivité des peuplements, même s'ils ne sont mesurables parfois qu'après plusieurs rotations.

Dans les peuplements de petits diamètres (stade 1^{re} éclaircie, relevés de couvert, taillis, etc.), la part de houppier dans la biomasse totale est plus importante : la récolte des arbres entiers conduit donc à l'exportation de fortes quantités d'éléments minéraux supplémentaires par rapport à une récolte du bois fort seul.

Quel rôle des menus-bois pour la biodiversité des sols forestiers ?

Les sols forestiers abritent des espèces variées et impliquées dans le cycle biologique de ces sols riches en matières organiques (encadré 1). Le rôle du bois mort au sol pour la biodiversité forestière est connu et pris en considération par les gestionnaires depuis de nombreuses années. Près de 25 % des espèces forestières sont saproxyliques : elles dépendent directement du bois mort en tant qu'habitat et que ressource alimentaire. De nombreux insectes, notamment des Coléoptères, et de nombreuses espèces de champignon sont strictement inféodés au bois mort. Mais si les pièces de bois mort de gros diamètre ont acquis un statut d'emblème de la préservation de la biodiversité dans la gestion forestière, les menus-bois, même les plus fins, jouent également un rôle essentiel pour de nombreux taxons, souvent peu visibles et peu connus. Selon leur taille, les pièces de bois mort hébergent des taxons différents et le maintien de pièces de toutes dimensions, et à divers stades de décomposition est donc nécessaire.

Les menus-bois fournissent un abri pour la faune forestière et assurent un rôle de protection physique du sol, en maintenant l'humidité du sol et en le protégeant des fortes chaleurs. Par ailleurs, leur place dans les cycles de décomposition de la matière organique en fait un compartiment

essentiel pour la biodiversité des sols. Les champignons, décomposeurs comme ectomycorhiziens, sont fortement dépendants de la présence de bois mort au sol, même peu dégradé. Certaines espèces de champignons, souvent discrètes, sont même exclusivement associées aux menus-bois.

Quels effets de la récolte des menus-bois sur la biodiversité des sols ?

Il est difficile d'apporter une réponse unique à cette question tant les effets dépendent des contextes pédoclimatiques, des taxons, des pratiques de gestion et des temps de réponse. L'expertise collective CRREF² a dédié un chapitre aux effets de la gestion des rémanents sur la biodiversité forestière.

En général, l'enlèvement des rémanents a des effets négatifs à court terme (entre 1 et 5 ans) sur les communautés microbiennes, la macro, la méso et la microfaune. Ces effets sont souvent transitoires et s'estompent à moyen terme (10-15 ans après) pour certains groupes d'espèces. À l'inverse, d'autres taxons voient leur abondance réduite sur le long terme (> 20 ans). Parfois, ces effets se traduisent plutôt par une modification de la composition des communautés (chez les bactéries et champignons par exemple).

Encadré 1 : La biodiversité des sols forestiers

La biodiversité des sols forestiers est constituée d'organismes de toutes tailles, depuis les vertébrés (rongeurs, reptiles, etc.) jusqu'aux microorganismes (champignons et bactéries, tableau 1). La litière héberge un grand nombre d'organismes qui participent à la décomposition des débris végétaux et assurent le recyclage des matières organiques et des éléments nutritifs du sol. Les espèces de surface détritivores (insectes, vers de terre épigés) vont transformer les litières, qui seront enfouies plus en profondeur par les espèces « ingénieuses »

(insectes, vers anéciques, ...) qui naviguent entre la surface et les horizons plus profonds. Les vers endogés vont ensuite brasser les éléments organiques et minéraux en profondeur. Les communautés microbiennes comme les bactéries ou les champignons saprotrophes recyclent ces éléments nutritifs pour les rendre assimilables par les végétaux. Les champignons mycorhiziens, associés aux racines de près de 90 % des espèces végétales, permettent l'absorption et l'échange d'eau et d'éléments nutritifs par les arbres et plantes vasculaires.

Classe de grandeur	Ordre de grandeur	Exemple d'organismes
Communautés microbiennes	< 0,2 mm – plusieurs cm (pour les champignons)	Bactéries, archées, champignons micro et macroscopiques
Microfaune	< 0,1 mm	Protozoaires, nématodes, tardigrades, etc.
Mésafaune	0,1 – 2 mm	Acariens, collemboles, insectes, etc.
Macrofaune	2 mm – 100 mm	Vers de terre, myriapodes, insectes, arachnides, gastéropodes, crustacés terrestres, etc.
Mégafaune	> 100 mm	Amphibiens, reptiles, mammifères, etc.

↑ **Tableau 1.** Les grands groupes de la biodiversité du sol

Beaucoup de ces résultats sont issus d'études d'Amérique du Nord ou d'Europe du Nord, car nous manquons d'expérimentations et de recul sur les effets de la récolte par arbres entiers sur la biodiversité des sols dans nos contextes. La prise en compte de la biodiversité des sols dans les recommandations de gestion est donc encore très partielle.

Un réseau expérimental, le réseau MOS (Matières Organiques des Sols), a été mis en place en 2013 pour étudier les effets du retrait total des litières et des menus-bois sur la fertilité et sur la biodiversité des sols forestiers³. Ses résultats permettront de mieux comprendre le rôle des menus-bois dans l'écosystème.

Quelles sont les alternatives et les bonnes pratiques ?

Depuis une dizaine d'années, plusieurs projets de recherche et développement se sont saisis de la problématique des effets de la récolte des menus-bois sur la fertilité des sols. Ils ont abouti entre autres à l'établissement d'outils d'aide à la décision pour les gestionnaires et de recommandations de gestion. Quelle que soit la sensibilité du sol, la règle n°1 est de ne pas récolter les feuillages (encadré 2).

Les autres recommandations dépendent de la sensibilité des sols à l'export des rémanents. L'indicateur INSENSE, disponible sur l'application ForEval^a et facile à utiliser sur le terrain, permet de définir cette sensibilité à partir de 5 paramètres : la forme d'humus, la texture à 10 cm, la profondeur de sol prospectable par les racines, la profondeur d'apparition du calcaire actif et la grande région écologique (GRECO). Le croisement des 5 critères fournit une note unique de sensibilité du sol à l'export des menus bois : sensibilité faible, moyenne, partielle ou forte. Seuls 30 % des sols forestiers présentent une sensibilité faible⁴.

Le guide de recommandations GERBOISE⁵ a ensuite décliné des préconisations de maintien minimal de menus-bois sur site en fonction des classes de sensibilité INSENSE et des statuts de protection de la biodiversité (tableau 2).

Même lorsqu'elle est possible, la récolte des menus-bois ne devrait survenir qu'à un seul stade du peuplement (soit au stade juvénile, soit lors de la coupe définitive) pour permettre la « recharge » du sol en nutriments. Sinon, deux récoltes arbres entiers doivent être espacées d'au minimum 15 ans sur sol peu sensible et d'au moins 30 sur sol moyennement sensible. Il y a donc un fort enjeu de documentation sur le long terme de toutes les interventions survenues sur chaque parcelle. Une récolte des menus bois lors des coupes d'ensemencement ou définitive doit alors être renseignée afin de garantir un laps de temps suffisant si on envisage une exploitation par arbres entiers lors des dépressages ou de la 1^{re} éclaircie.

Encadré 2 : Recommandation n°1 : ne pas récolter les feuillages, quelle que soit la sensibilité des sols

Le feuillage est le compartiment de l'arbre le plus riche en éléments minéraux (notamment azote, calcium et potassium) : s'il ne représente que quelques pourcentages de la biomasse totale de l'arbre, il concentre à lui seul près de 20 % de la quantité en éléments minéraux essentiels (N, P, K, Ca, Mg). Pour le chêne par exemple, la concentration en azote dans les feuilles est six fois plus élevée que dans le bois du tronc. La récolte d'arbres entiers en feuilles (feuillus ou résineux) occasionne donc une exportation d'éléments minéraux supplémentaires conséquente et dommageable pour le cycle biogéochimique du sol, quelle que soit sa fertilité, les feuilles récoltées n'étant pas restituées au sol. L'exportation du feuillage, même ponctuelle dans la vie du peuplement, affecte directement la nutrition des arbres et leur croissance sur le long terme. Il est donc impératif de proscrire toute exportation des feuillages hors de la parcelle, sur tous types de sol, même peu sensibles aux exportations minérales.

Cela implique bien sûr des difficultés d'ordre logistique pour les chantiers d'exploitation. Pour les essences à feuillage caduque, une solution serait de récolter uniquement lorsque les houppiers sont hors feuilles. Or, la grande majorité des sols forestiers sont sensibles au tassement et donc impraticables plusieurs mois par an, en particulier en hiver. Il est alors impossible de sortir ces bois hors feuilles.

La solution actuellement recommandée, pour les essences caduques ou à feuilles persistantes, consiste à laisser ressuyer les houppiers sur la parcelle plusieurs mois, afin que les feuilles sèchent et se détachent des branches avant le débardage des tiges récoltées. La durée préconisée par le guide GERBOISE est de 3 mois. Néanmoins, dans le cadre du projet TAMOBIOM, un test de ressuyage de fagots de houppiers de bouleau et de chêne récoltés en feuilles a montré que cette durée de 3 mois était insuffisante, la durée optimale étant comprise entre 6 et 9 mois selon les sites. Cette solution impliquerait alors un débardage un an après l'abatage pour respecter les conditions de praticabilité des sols.

Une alternative serait de prévoir lors de l'abatage une découpe supplémentaire à la base du houppier afin laisser en forêt la majeure partie du houppier en feuilles.

Statut de protection de la biodiversité	Sensibilité des sols à l'exportation minérale		
	Faible	Modérée	Forte
Pas de statut particulier	Laisser au moins 1/10 ^e de menus bois	Laisser au moins 3/10 ^e de menus bois	Récolte déconseillée
Statuts intermédiaires	Laisser au moins 2/10 ^e de menus bois	Laisser au moins 3/10 ^e de menus bois	Récolte déconseillée
Statuts forts	Récolte de menus bois fortement déconseillée (lorsque pas déjà interdite)		

↑ **Tableau 2.** Recommandations de récolte raisonnée des menus-bois⁵

Sur les sols peu sensibles, la quantité de 10 % des menus-bois correspond à peu près aux pertes d'exploitation habituelles.

Des solutions techniques existent au moment de l'exploitation pour laisser davantage de menus-bois :

- Démembrer les houppiers lors des coupes d'ensemencement et définitives et imposer une découpe systématique à 7 cm.
- Pour les exploitations mécanisées d'arbres de petits diamètres, procéder à une découpe supplémentaire à la cisaille à la base des houppiers permet de laisser au sol au moins 20 ou 30 % des menus-bois selon les recommandations GERBOISE.

Néanmoins, nous ne disposons pas à l'heure actuelle de protocole fiable et facile à mettre en œuvre en gestion pour contrôler a posteriori la quantité de menus-bois laissés au sol. Établir un tel protocole est un des objectifs ambitieux du projet GOLD (Opérationnalité des recommandations de GERBOISE sur la durabilité des sols forestiers) coordonné par le Groupe Coopération Forestière, et auquel plusieurs Directions Territoriales de l'ONF et la filiale ONF Energie participent.

Emila Akroume

ONF - Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Bourgogne Franche-Comté

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

- 1 : Landmann G, Nivet C (coord.) et al. (2014) Projet Resobio. Gestion des résidus forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Angers : ADEME, Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 243 p.
- 2 : Landmann G, Delay M, Marquet G (coord) et al. (2023). Expertise collective CRREF « Coupes Rases et Renouveau des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique », Rapport scientifique de l'expertise, Paris : GIP ECOFOR, RMT AFORCE, 782 p.
- 3 : 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 de l'ONF, 54, 9-21.
- 4 : Pousse N, Augusto L, Akroume E, Deleuze C, Pilard-Landau B, Noé A, Pischedda D, Richter C (2020) Gestion durable des sols forestiers : nouvelles connaissances et boîte à outils. Rendez-vous techniques de l'ONF, 67-68, 3-14.
- 5 : Landmann G, Augusto L, Pousse N, Gosselin M, Cacot E, Deleuze C, Bilger I, Amm A, Bilot N, Boulanger V, Leblanc M, Legout A, Pitocchi S, Renaud J-P, Richter C, Saint-André L, Schrepfer L, Ulrich E (2018) Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. Paris : ECOFOR, Angers : ADEME, 50p.
- a : <https://play.google.com/store/apps/details?id=fr.inrae.foreval&hl=fr&gl=US>
- Pour aller plus loin 1 : ADEME (2020) Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières. Clefs pour agir. 40 p.
- Pour aller plus loin 2 : 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>).



Quel est l'impact des plantations de Douglas sur les sols forestiers ?

L'équipe INRAE de l'Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers s'intéresse à l'impact de Douglas sur la production de nitrates dans les sols français depuis les années 90. Les chercheurs partagent ici leurs principaux résultats.

Originaire de l'ouest de l'Amérique du Nord et introduit en France au milieu du 19^e siècle, le Douglas couvre aujourd'hui 420 000 ha de la forêt française. Sa productivité moyenne de 15 m³/ha/an et les propriétés de son bois en font l'une des principales essences utilisées en sylviculture de production dans le Limousin, en Auvergne, sur les monts du Beaujolais et dans le massif du Morvan. Pour assurer une gestion durable des peuplements, il est toutefois indispensable de bien connaître les effets du Douglas sur le sol et sur l'environnement en général.

L'unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers (BEF) à INRAE s'intéresse aux Douglas depuis le début des années 90. Alors que les coupes rases provoquent généralement une augmentation de nitrates dans le sol, l'équipe a mis en évidence une forte diminution de la concentration de nitrates circulant dans la solution du sol après une coupe rase de Douglas dans le Beaujolais. Cette observation pose la question d'un possible contrôle de la nitrification par le Douglas. De là à en déduire que les peuplements de Douglas stimulaient la production de nitrates dans le sol, il n'y a qu'un pas... qui n'a pas été franchi ! Mais l'hypothèse a été posée et les investigations se sont poursuivies depuis lors.

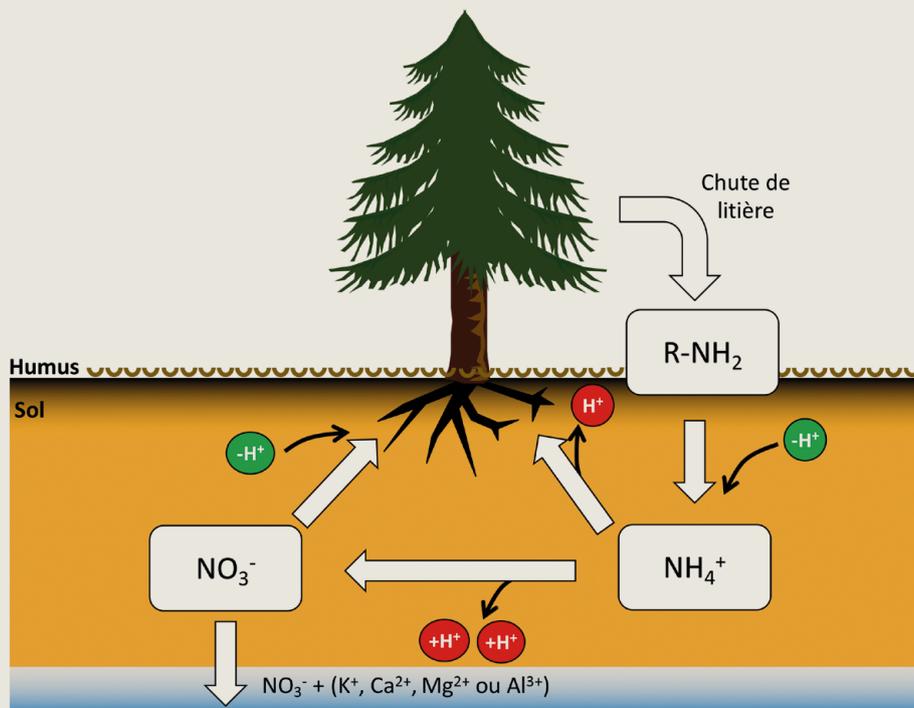
Des travaux complémentaires menés par l'équipe de recherche BEF dans les années 90 sur 3 douglasaies dans le Beaujolais (Vauxrenard) ont montré que les sols sous les plantations de Douglas présentaient une très forte minéralisation de l'azote organique du sol et une production de nitrate importante. Le passé agricole du site pouvait cependant expliquer une partie de ce comportement. Des travaux menés sur le site atelier de Breuil Chenue (Morvan) depuis le début des années 2000 conduisent néanmoins aux mêmes conclusions, alors que le passé du site est cette fois forestier : une production de nitrate importante dépassant la capacité d'immobilisation du sol (prélèvement par la végétation ou assimilation microbienne) est mesurée sous Douglas en comparaison d'autres essences.

Or la transformation d'ammonium en nitrate (les deux formes d'azote minéral assimilables par l'arbre) et la balance production-consommation joue un rôle fondamental pour la fertilité des sols. En effet, lorsque l'azote organique (issu notamment de la litière) est transformé en ammonium puis en nitrate, et que ce nitrate n'est pas prélevé par l'arbre (ou immobilisé par les microorganismes), on assiste à une acidification des sols (voir encadré). Les cations nutritifs Ca²⁺ (calcium), Mg²⁺ (magnésium) et K⁺ (potassium) sont progressivement remplacés par des protons H⁺ et les nitrates très mobiles (car très solubles dans l'eau et peu retenus sur la phase solide du sol) emmènent avec eux ces cations nutritifs, entraînant une perte de fertilité pour le sol (voir encadré). La production de nitrate n'est pas en soi dommageable, mais si le nitrate produit n'est pas consommé, alors le sol s'acidifie.

Les chercheurs du BEF ont donc souhaité approfondir leurs recherches sur le comportement du Douglas vis-à-vis du cycle de l'azote. Pour valider l'hypothèse d'une production excédentaire (production > consommation) de nitrate dans les sols des plantations de Douglas, il fallait élargir la gamme de situations testées, en étudiant finement plusieurs peuplements de Douglas dans des situations stationnelles et géographiques variées.

En 2011, l'unité BEF a donc mis en place en collaboration avec l'ONF et des propriétaires privés le réseau Douglas Biogéochimie^a, composé de 11 placettes instrumentées (pour plus de détail, voir RDV techniques n°53 - automne 2016^b) couvrant une large diversité pédoclimatique sous des peuplements de Douglas âgés de 40 à 60 ans, afin d'étudier la production et le devenir du nitrate sous les Douglas et les possibles conséquences pour les sols et les eaux de surface. Ce dispositif a permis de montrer que sous les peuplements du réseau Douglas, 90 à 95 % de l'azote organique minéralisé est transformée en nitrates NO₃⁻. De plus, cette production de nitrates NO₃⁻ était pour bon nombre de sites (sept sur les onze étudiés) élevée et

Le cycle de l'azote et l'acidification des sols



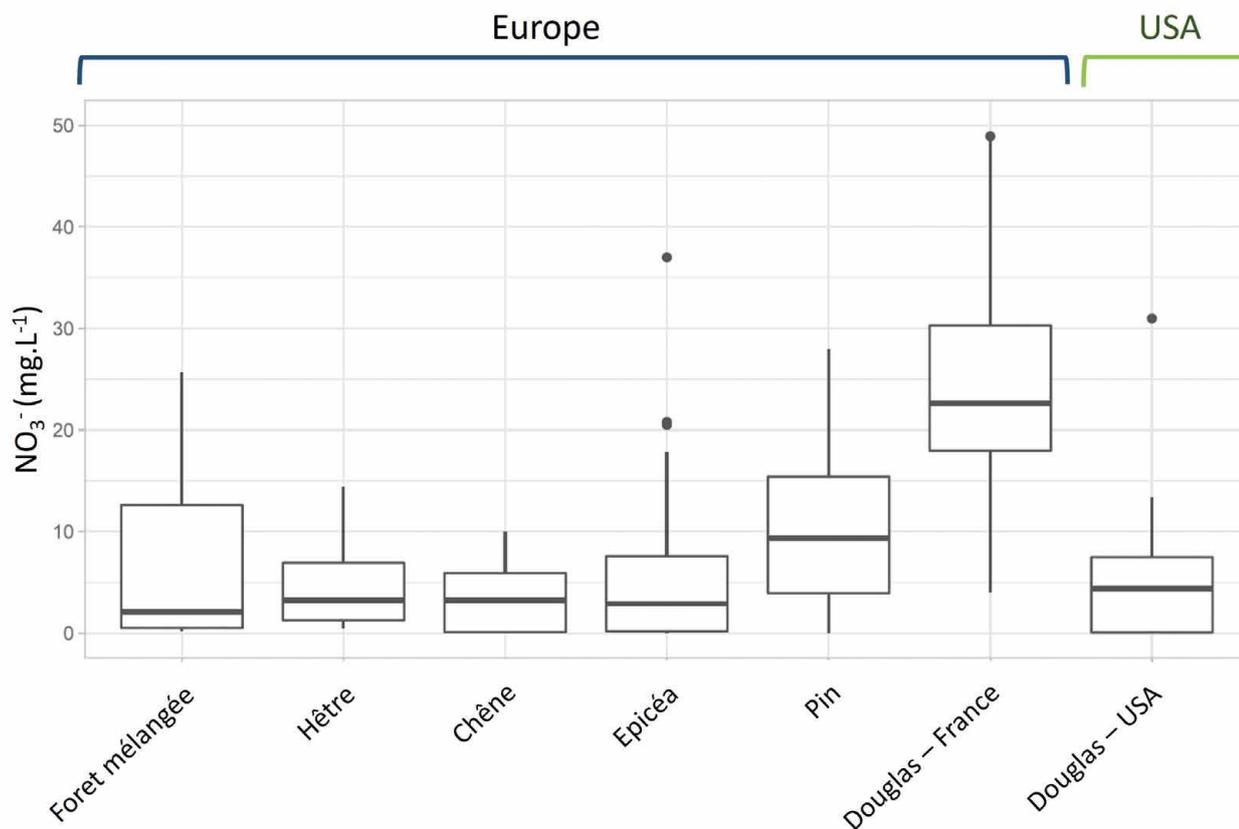
↑ Figure 1. Bilan de proton simplifié pour le sol, associé à la minéralisation de l'azote organique

L'acidification des sols est un processus naturel, indispensable à la formation des sols et qui permet de rendre des nutriments disponibles pour les plantes. Cependant, son accélération conduit à un épuisement accéléré des éléments du sol et à la libération d'éléments indésirables pour les écosystèmes. Toute réaction susceptible de libérer des protons H^+ vers le sol peut provoquer son acidification. L'une de ces réactions est directement liée au cycle de l'azote comme nous l'illustrons ci-dessous.

Sous l'action des microorganismes du sol, l'azote organique issu notamment de la litière se transforme en ammonium (NH_4^+) et cette réaction consomme un proton du sol. L'ammonium a alors deux devenir possibles : il peut être consommé par l'arbre qui, pour conserver son électroneutralité (autant de charges plus que de charges moins), va relâcher un proton dans le sol. Avec un proton consommé et un proton relâché, le bilan de proton pour le sol est nul et il n'y a pas d'acidification du sol. L'autre possibilité est la transformation de l'ammonium en nitrate (NO_3^-). Cette réaction libère deux protons H^+ dans le sol. Ce nitrate a alors également deux devenir possibles : il peut être prélevé par l'arbre, qui doit relâcher un OH^- (capable de neutraliser un proton H^+) dans le milieu pour conserver son électroneutralité, ou alors

il peut être drainé dans les profondeurs du sol. Dans le premier cas, le bilan de protons pour le sol est nul (deux protons produits pour deux protons consommés), mais dans le deuxième cas, le bilan de protons pour le sol est de + 1 et le sol s'acidifie !

Il se trouve, de plus, que le nitrate est très mobile dans les sols tempérés : s'il n'est pas prélevé, il est évacué dans les eaux de drainage, nécessairement accompagné d'un cation pour respecter l'électroneutralité. Les protons étant fixés très rapidement sur la capacité d'échange cationique (CEC : quantité totale de cations qu'un sol peut absorber ou échanger dans des conditions de pH bien définies), alors, toujours en vertu de l'électroneutralité, mais du solide cette fois, un cation est désorbé de la CEC : ce sera le cation le plus facile à désorber dans un contexte donné, d'abord les cations nutritifs (calcium, magnésium, potassium) puis l'aluminium. La perte de nitrate et de cations nutritifs correspond à une perte de fertilité chimique pour le sol, à une acidification du sol (perte de cations capables de neutraliser les protons) et à un stress potentiel pour les eaux de surface, si par exemple du nitrate et de l'aluminium apparaissent dans les ruisseaux (les salmonidés disparaissent quand la concentration en Al^{3+} devient supérieure à $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$).



↑ **Figure 2.** Concentrations mesurées en nitrate dans les solutions de sol sous plusieurs essences forestières en Europe et dans des peuplements de Douglas de la côte pacifique aux USA. En Europe, les concentrations en NO_3^- sous Douglas sont supérieures à celles mesurées sous d'autres essences, mais également à celles mesurées sous Douglas aux USA.

supérieure à la consommation dans le profil de sol. Il en résulte une concentration en nitrates élevée dans les eaux de sol, que ce soit à 15 ou à 60 cm de profondeur, avec une perte de nitrate importante en bas du profil de sol. Sur trois sites, la concentration moyenne dépasse même la norme européenne de potabilité de l'eau : 50 mg.l⁻¹. Attention néanmoins aux interprétations trop hâtives, il s'agit ici de concentrations dans des eaux de sol, et qui pourraient être atténuées par dilution ou dénitrification lors de leur transit vers les eaux souterraines ou les cours d'eau.

Sous les peuplements de Douglas étudiés qui présentent des productions excédentaires de nitrate, nous sommes donc dans le cas de figure présenté plus haut et qui entraîne une acidification des sols et une perte des cations. Le réseau de placettes expérimentales a également permis d'établir que sur les sols les plus acides et pauvres chimiquement, ce sont des ions aluminium Al^{3+} qui accompagnent le nitrate dans son transfert, alors que sur sols plus riches, ce sont les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ qui sont entraînés, en fonction de leur disponibilité dans le profil de sol. Ces pertes de calcium, magnésium et potassium sont parfois élevées et elles pourraient conduire à l'épuisement rapide des réservoirs

disponibles dans les sols si elles ne sont pas compensées par les apports atmosphériques, l'altération des minéraux présents dans les sols ou encore par des apports anthropiques (amendement par exemple). Des recherches se poursuivent pour évaluer la balance entre les entrées et les sorties de l'écosystème.

Une revue bibliographique montre aussi qu'en Europe, les concentrations en nitrates NO_3^- dans les solutions de sol sous Douglas sont généralement supérieures à celles mesurées sous d'autres essences (figure 2). Plus étonnant : ces concentrations sont également plus élevées que sous les peuplements de Douglas dans son aire d'origine.

Cette production excédentaire de nitrates sous les peuplements de Douglas en France pourrait s'expliquer par une absence d'inhibition, voire une stimulation de la nitrification (réaction qui transforme le NH_4^+ en NO_3^-), causée par un microbiote différent de celui présent dans l'aire d'origine du Douglas (ce microbiote n'aurait pas été importé avec son hôte). Une autre hypothèse complémentaire est que la disponibilité en azote est beaucoup plus faible dans son aire d'origine qu'en France. L'équipe de recherche envisage d'établir des partenariats avec des chercheurs américains

pour vérifier ces hypothèses, mais la priorité aujourd'hui est de donner des recommandations de gestion pour limiter la dégradation des sols forestiers dans l'hexagone. Et cela passe par une identification des facteurs qui favorisent la production de nitrate sous Douglas.

Même s'ils étaient minoritaires, certains sites du réseau Douglas ne présentaient pas de concentrations élevées en nitrates dans les sols et les eaux de drainage : cela signifie que des facteurs pédologiques ou climatiques pourraient moduler la production de nitrate dans les peuplements de Douglas. Compte tenu du grand nombre de variables à prendre en compte, les 11 placettes du réseau expérimental utilisées jusqu'ici n'étaient pas suffisantes pour identifier ces facteurs et une campagne spécifique a donc été organisée en 2021 sur 89 placettes supplémentaires réparties dans l'aire de production du Douglas. L'exploitation des données est en cours et l'équipe BEF étudie les relations entre la production de nitrates dans les sols et les nombreux paramètres pédologiques et climatiques collectés. Les premiers résultats montrent que la production de nitrates sous Douglas pourrait être modulée par la texture du sol, les quantités de carbone et d'azote présents dans le sol, l'altitude ou encore la pluviométrie annuelle. L'exploration des données continue pour asseoir des recommandations de gestion visant à protéger les sols sous Douglas, en trouvant les combinaisons gagnantes permettant de limiter l'acidification des sols et la perte de fertilité chimique.

Remerciements :

Laurent BISSONNIER (Gestionnaire Forestier Professionnel),
Jocelyn GAILLARD (CNPF), Marion BOLAC (CNPF) et
Adrien JACQUES (ONF)

Arnaud Legout

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Arnaud Reichard

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Gilles Nourrisson

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Jérôme Demaison

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Alexia Paul

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Bernd Zeller

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Gregory Van Der Heijden

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Charline Henry

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

Pascal Bonnaud

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

Jacques Ranger

INRAE - Unité de recherche Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

• 1 : Zeller B, Legout A et al. (2016) Le réseau Douglas, un dispositif dédié à la compréhension de l'effet de cette essence sur le cycle de l'azote. Les RenDez-Vous techniques de l'ONF, 53, 24-35.

• a : <https://in-sylva-france.hub.inrae.fr/services/in-situ/reseau-douglas-bgc>



Le carbone dans les sols forestiers

Essentiels dans la lutte contre le changement climatique, les écosystèmes forestiers jouent un rôle clé en captant et stockant le carbone atmosphérique. Si la biomasse des arbres est souvent mise en avant, les sols forestiers représentent un réservoir colossal, renfermant près de 40 % du carbone organique terrestre. Emila Akroume nous explique dans cet article comment fonctionne le stockage du carbone dans les sols forestiers et ce que l'on sait des impacts de la gestion forestière sur ces stocks.

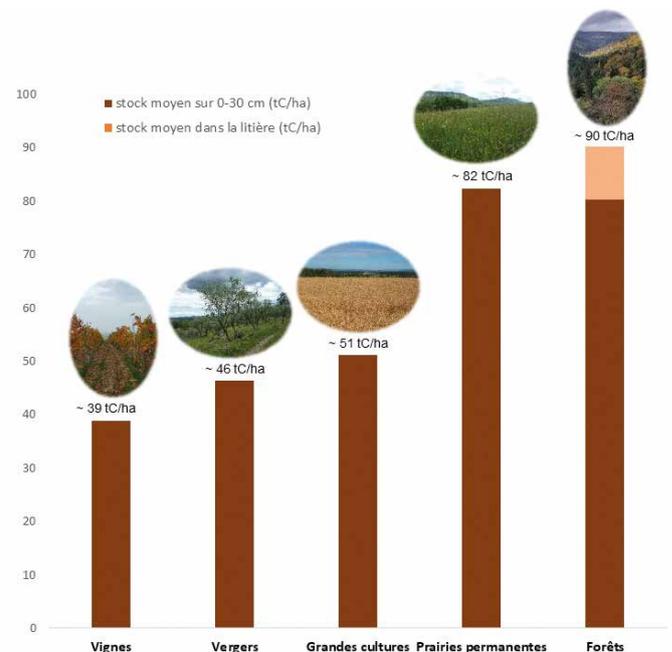
La forêt française joue un rôle essentiel dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre de la France. La séquestration de carbone dans la biomasse vivante est estimée à environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre^a et est au cœur de la Stratégie Nationale Bas-Carbone pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050. En plus d'absorber d'importantes quantités de carbone chaque année, les écosystèmes forestiers représentent un réservoir colossal de carbone, en grande partie grâce à leurs sols. À l'échelle mondiale, les sols constituent la deuxième réserve de carbone terrestre, la première étant les océans. Les sols forestiers pour leur part renferment 40 % des stocks de carbone organique terrestre.

Qu'est que le stockage de carbone ?

Par le processus de photosynthèse, les peuplements forestiers captent le carbone présent dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et le fixent dans la biomasse. Ce carbone est alors séquestré dans le bois et les différents tissus aériens et racinaires des arbres. La biomasse forestière constitue donc un réservoir de carbone puisqu'elle stocke sur le long terme le carbone atmosphérique. Mais la forêt est un double réservoir : elle stocke autant de carbone dans sa biomasse (aérienne et racinaire) que dans son sol.

Dans le sol, le carbone est stocké dans la litière et dans le sol minéral via les processus décrits plus loin. En France métropolitaine, ce sont les sols forestiers qui sont les plus riches en carbone, avec en moyenne 90 tonnes de carbone à l'hectare (litière + sol minéral) (figure 1).

Toutefois, pour jouer pleinement son rôle d'atténuation des émissions de CO₂, l'écosystème forestier doit également être un puits de carbone, c'est-à-dire continuer de capter et de stocker du carbone atmosphérique. Pour être un puits, la forêt doit séquestrer plus de carbone qu'elle n'en émet, donc avoir un flux positif d'entrée de carbone dans l'écosystème. Au niveau de la biomasse aérienne, cela se traduit par un accroissement des peuplements qui doit



↑ Figure 1. Stocks moyens de carbone dans les 30 premiers cm de sol selon l'occupation du sol¹

être supérieur aux pertes par récolte, mortalité, dépérissements, aléas climatiques, etc. Il en est de même pour le puits sol qui accumule du carbone issu des matières organiques décomposées via l'activité des organismes du sol, qui émettent eux-mêmes du CO₂ en respirant. Certains événements naturels (incendies) ou anthropiques (perturbations du sol) peuvent au contraire libérer du carbone maintenu dans les sols.

En 2020, l'étude 4 pour mille² mettait en lumière l'énorme potentiel des sols dans la lutte contre le changement climatique en proposant une politique ambitieuse d'augmentation annuelle de 4/1000 (soit 0,4 %) des stocks de carbone dans les sols (surtout agricoles) pour compenser

la totalité des émissions annuelles de CO₂ dues aux activités humaines. Ce chiffre est plutôt symbolique et est aujourd'hui dépassé, nos émissions de CO₂ ayant continué de progresser ces 10 dernières années. Cette étude pointait aussi le fort enjeu qui pèse sur les stocks de carbone des sols forestiers. En effet, des mesures issues notamment des sites RENECOFOR montrent que le puits français « sol forestier » présente un flux annuel de +4/1000 du stock de carbone³. Les sols des forêts françaises répondraient donc déjà à l'objectif « 4/1000 ». L'étude 4 pour mille n'a pas identifié de pratiques permettant d'augmenter les stocks de carbone dans les sols forestiers français, elle met en avant la nécessité de les préserver.

Comment le carbone est-il stocké dans le sol ?

Dans les sols, le carbone peut être présent sous forme minérale (sous forme de carbonate par exemple), qu'on ne traitera pas ici, ou sous forme organique. Le carbone organique est issu de débris végétaux, d'animaux morts et de nécromasse microbienne, en particulier du mycélium de champignons morts, très abondants dans nos sols forestiers. Ces composés sont regroupés sous le terme de matières organiques. Ils sont présents en grande quantité en surface, dans les litières grâce aux chutes régulières de bois mort et de feuilles, mais aussi en profondeur avec les racines mortes de végétaux.

Les processus de dégradation des matières organiques

Tous ces débris sont dégradés en fragments de plus en plus petits par les organismes décomposeurs présents dans les sols (figure 3). La chaîne de dégradation des matières organiques implique des organismes de taille variée : la macrofaune (vers de terre, cloportes, mille-pattes, etc.), la meso et microfaune (collembolles, nématodes, etc.) et des microorganismes (bactéries et champignons). Ces derniers interviennent en dernier lieu, agissant au niveau moléculaire pour casser les liaisons de grosses molécules complexes comme la cellulose, la lignine ou la chitine (qui compose les parois cellulaires de champignons et les exosquelettes des insectes et arthropodes) et les fragmenter en plus petits composés assimilables par les arbres et les organismes du sol. L'activité biologique, et en particulier celle des vers anéciques, permet la circulation de ces composés organiques entre la surface du sol et les horizons plus profonds.

Une grande quantité de carbone est stockée dans la litière, plus ou moins épaisse selon les essences en place et le contexte pédoclimatique. Contrairement à celles des sols cultivés ou des prairies, les litières forestières sont riches en lignine et en différents tanins, des composés difficiles à dégrader. La lignine en particulier est une molécule de grande taille, très complexe, principalement décomposée par les champignons lignivores (figure 2).

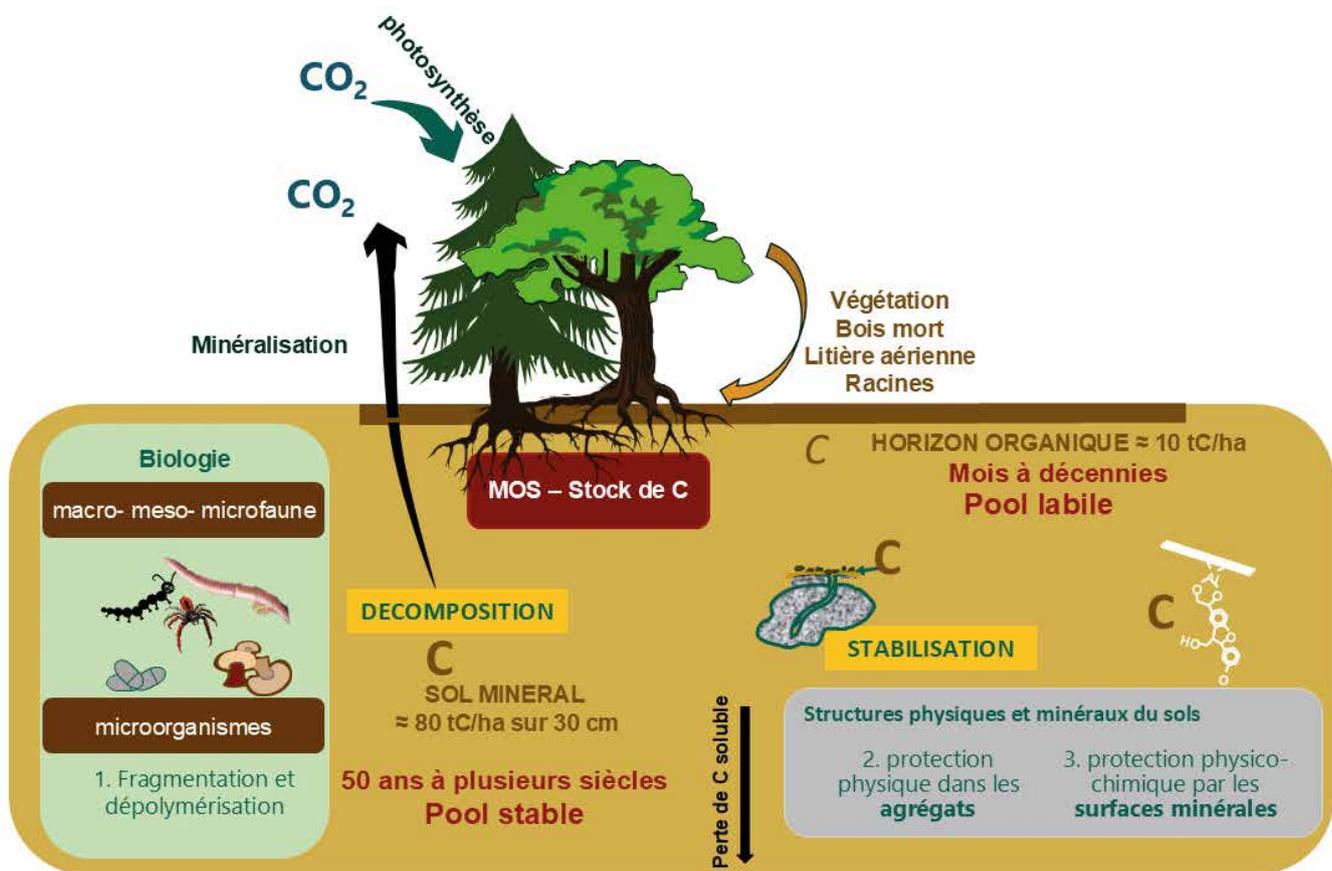


↑ Figure 2. Bois mort sur pied colonisé par *Fomes fomentarius*, champignon lignivore

Cette propension de certaines molécules à résister aux processus de dégradation est appelée récalcitrance chimique. Ces molécules peuvent rester intactes durant plusieurs années, et ainsi contribuer au stockage de carbone organique.

Processus de stabilisation du carbone organique dans le sol

Les composés issus de la décomposition des matières organiques ont un temps de résidence allant de l'ordre de quelques minutes pour les plus facilement assimilables par les organismes du sol à plusieurs siècles ou millénaires pour les plus stables. On parle de pool de carbone labile pour qualifier le carbone organique des composés facilement dégradables par l'activité biologique, stocké pour des durées de quelques jours à quelques années. Le carbone labile est plutôt situé en surface ou dans les horizons organiques du sol. Le pool de carbone stable correspond au carbone stocké sur le long terme, parfois plus de 1000 ans, dans les horizons plus profonds. Ainsi, plus on descend en profondeur sur le profil de sol, plus le carbone y est ancien et stable. Les horizons de surface sont bien plus riches en



↑ **Figure 3.** Schéma récapitulatif des processus de décomposition et stabilisation du carbone organique dans le sol (modifié d'après un schéma de Delphine Derrien)

carbone, mais celui-ci est plutôt « jeune ». S'il se décompose rapidement, le pool labile se renouvelle aussi beaucoup plus rapidement par les chutes de litière, de bois mort ou les cadavres d'animaux. Le pool de carbone stable pour sa part peut mettre plus de temps à se reconstituer.

Il existe trois principaux mécanismes de stabilisation des matières organiques dans le sol :

- la **récalcitrance chimique** : le carbone peut rester stocké sur le long terme dans des molécules difficiles à dégrader par les organismes du sol ;
- la **protection physique** au sein des agrégats : les composés organiques sont inclus dans des agrégats de sol, ce qui leur offre une protection physique face à l'action des organismes décomposeurs ;
- l'**interaction avec les surfaces minérales**, notamment les argiles : les molécules sont liées chimiquement aux éléments minéraux, ce qui permet une stabilisation du carbone organique.

Facteurs qui influencent le stockage de carbone dans le sol

Les capacités d'un sol à stocker du carbone dépendent fortement des conditions climatiques qui conditionnent les processus de décomposition des matières organiques, et de ses caractéristiques pédologiques, qui déterminent le potentiel de stabilisation du carbone.

Ainsi, en forêt tropicale où les températures, l'humidité et les précipitations sont élevées, les processus de décomposition sont très rapides : peu de carbone stable est stocké dans le sol. À l'inverse, dans les contextes froids des forêts boréales, l'activité biologique est très lente (voire quasiment absente si le sol est engorgé comme dans les tourbières) : les sols fixent alors d'énormes stocks de carbone sur le long terme.

Dans nos contextes, l'essence dominante joue un rôle important : en moyenne, les stocks de carbone sont plus élevés sous résineux, en grande partie car leurs litières sont plus épaisses et plus récalcitrantes. Ils sont aussi d'autant plus élevés en altitude, où l'activité biologique est réduite une partie de l'année. Par ailleurs, plus un sol est riche en argiles, plus il est susceptible de retenir durablement le carbone organique du fait des interactions minérales. Au contraire, les sols sableux sont plus pauvres en carbone organique.

Par ailleurs, l'ancienneté de l'état boisé (et plus généralement l'historique d'un site) influence fortement le niveau de stockage dans le sol, d'autant plus élevé que la forêt est ancienne (ce qui est différent de la maturité du peuplement).

Qu'est-ce que le déstockage de carbone ?

Dans un écosystème à l'équilibre, il est normal qu'un sol émette du carbone sous forme de CO₂ issu de la minéralisation des matières organiques. On parle de déstockage lorsque du carbone jusqu'alors stocké plus ou moins durablement se retrouve brutalement émis vers l'atmosphère. Lors d'incendies de forêt, la combustion de la litière entraîne une perte conséquente des stocks superficiels de carbone. Si les feux ne se reproduisent pas tous les ans, le stock de carbone de la litière peut alors se reconstituer en quelques années.

Le déstockage est aussi causé par une sur-minéralisation de la matière organique, lorsque le microclimat du sol est modifié ou lorsqu'un apport soudain d'oxygène ou de matière organique fraîche stimule l'activité des microorganismes dans les horizons plus profonds. Ils peuvent alors dégrader du carbone stable, stocké parfois depuis très longtemps. Ce déstockage de carbone ancien, accumulé sur le long terme, est le plus préjudiciable pour les stocks de carbone du sol. En effet, la reconstitution de ces stocks à leurs niveaux initiaux est très lente.

Nos pratiques de gestion forestière impactent-elles ces stocks de carbone ?

De nombreuses études scientifiques traitent de l'effet des opérations sylvicoles sur les stocks de carbone des sols. Bien qu'elles soient souvent menées dans des contextes pédoclimatiques différents, où les pratiques sont éloignées des nôtres (Europe du Nord, Canada, USA), elles dégagent des tendances importantes. Une étude⁴ publiée en 2019 dans Forêt Entreprise par Augusto et ses collègues propose un état des connaissances à ce sujet.

La plupart des choix de gestion comme les travaux, le capital sur pied ou les éclaircies n'ont pas d'effet sur les stocks de carbone des sols. Une très forte éclaircie peut entraîner une diminution des stocks de carbone dans la litière si le prélèvement dépasse 55 % du capital. Une étude menée en 2015 a comparé des réserves forestières (réserves biologiques intégrales ou dirigées) hors gestion depuis plus ou moins longtemps, à des parcelles voisines sur des stations similaires, mais encore gérées. Aucune différence nette n'a été identifiée au niveau des stocks de carbone dans les 50 premiers centimètres de sol⁵.

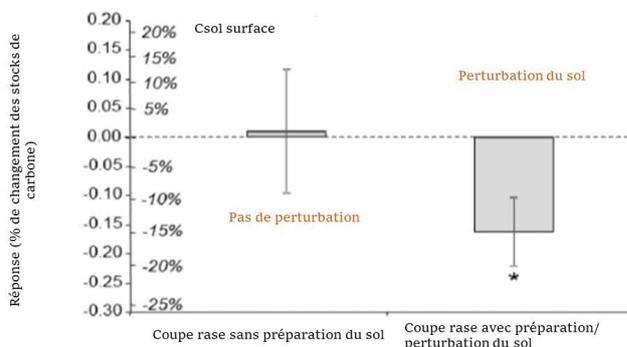
Toutefois, Augusto et ses collègues mettaient en lumière que la phase de renouvellement des peuplements concentrait l'essentiel des enjeux de préservation des stocks de carbone des sols. En effet, c'est à ce stade qu'interviennent les opérations susceptibles de provoquer un déstockage

du carbone du sol : la coupe rase, la préparation mécanisée du site et la plantation. La mise à nu du sol lors d'une coupe rase modifie le microclimat et donc la température et l'humidité. Ces conditions, plus favorables à l'activité biologique, accélèrent la minéralisation de la matière organique qui induit une perte de carbone les quelques années suivant la coupe. De plus, en l'absence de couverture végétale, une partie du carbone organique des horizons superficiels peut être entraînée par lessivage dans les eaux de ruissellement.

Cette perte de carbone due à la coupe rase concerne principalement la litière et le sol superficiel, les horizons minéraux plus profonds étant peu impactés par la coupe rase seule. Cette perte représente environ 6 % du stock total de carbone du sol. Ces effets varient fortement en fonction du climat ou de la texture du sol. Cette perte due à la coupe rase peut être aggravée si elle a été accompagnée d'une récolte totale des houppiers, ou pis encore, si elle est suivie d'une préparation mécanisée du sol (figure 4). La perte peut alors atteindre 20 % du stock total et impacte aussi les horizons minéraux⁶. En effet, des perturbations physiques du sol comme le travail du sol avant plantation peuvent provoquer un déstockage en modifiant la structure du sol et en incorporant de la matière organique de la litière en profondeur si les horizons sont mélangés par l'outil⁷.

Ainsi, la plantation en elle-même n'a pas d'effet particulièrement négatif si elle n'est pas précédée d'un travail du sol lourd sur l'ensemble de la parcelle. De même, le travail du sol localisé, restreint à une surface limitée de la parcelle, permet de limiter le déstockage de carbone du sol⁷.

Il reste beaucoup d'inconnues, notamment en forêt tempérée, et un fort effort de recherche est nécessaire pour comprendre les phénomènes en jeu et pour décorrélérer les différents facteurs qui influencent le stockage de carbone dans les sols.



↑ Figure 4. Modification des stocks de carbone organique dans l'horizon superficiel en situation de coupe rase et de coupe rase suivie d'un travail du sol par rapport à un témoin sans coupe rase⁸

Conclusion

L'enjeu à préserver les fonctions de réservoir et de puits de carbone des sols est majeur pour le rôle d'atténuation que jouent les écosystèmes forestiers. Contrairement à l'agriculteur, le forestier ne dispose pas de levier d'action pour augmenter les stocks de carbone dans ses sols. La préservation de l'ensemble des propriétés du sol dans le cadre d'une gestion durable permet alors de préserver les stocks de carbone existants ainsi que les capacités des sols à continuer de le séquestrer sur le long terme. Ces capacités de séquestration reposent notamment sur la riche biodiversité des sols. Si le gestionnaire forestier n'a pas de pratique « stockante », il peut éviter au maximum toute dégradation délétère pour les stocks de carbone : tassement, appauvrissement chimique, érosion, etc.

Alors que les peuplements sont fragilisés par le changement climatique, la préservation du fonctionnement du sol est essentielle pour assurer aux arbres une capacité de résilience face aux aléas biotiques et climatiques. Les mécanismes de dégradation et de stockage des matières organiques dans le sol sont eux-mêmes impactés par le changement climatique : modification du régime des précipitations, hausse des températures, modification des taux d'humidité atmosphérique, intensité des aléas climatiques (incendies), dépérissements forestiers, perturbations des communautés du sol. Il demeure encore beaucoup d'inconnues quant à l'évolution des stocks de carbone dans les sols forestiers dans un climat changeant. Nos leviers d'actions ne résident donc qu'en la mise en œuvre de pratiques les moins impactantes possibles pour les fonctions du sol.

Emila Akroume

ONF - Pôle Recherche, Développement et Innovation, DT Bourgogne Franche-Comté

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

- 1 : Martin M, Saby N, Toutain B, Chenu J-C, Ratié C, Boulonne L (2019) Statistiques sur les stocks de carbone (0-30 cm) des sols du réseau RMQS. Recherche Data Gov. <https://doi.org/10.15454/RURZXN>
- 2 : Pellerin et al. (2020). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114p.
- 3 : Jonard M, Nicolas M, Coomes DA, Caignet I, Saenger A, Ponette Q (2017) Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574, 616-628.
- 4 : Augusto L, Saint-André L, Bureau F, Derrien D, Pousse N, Cécillon L (2019). Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole. *Forêt entreprise*, 245, 62-66.
- 5 : Cécillon L, Barré P, Berthelot A, Gosselin F, Guenet B, Barthès B, Abiven S, Chenu C, Baudin F, Nicolas M (2017). PICASO : pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers. Paris : ADEME Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. 102p.
- 6 : Landmann G, Delay M, Marquet G (coord) et al. (2023). Expertise collective CRREF « Coupes Rases et Renouveau des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique », Rapport scientifique de l'expertise, Paris : GIP ECOFOR, RMT AFORCE, 782p.
- 7 : Collet C, Akroume E, Boulanger V, Bureau F, Poullard L, Puyal M, Franco JP, Vast F (2024) Assurer la reprise des plants tout en préservant le sol : raisonner la préparation mécanisée du site avant plantation. *Rendez-vous techniques de l'ONF*, 80, 30-36.
- 8 : Achat DL, Fortin M, Landmann G, Ringeval B, Augusto L (2015). Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Nature, Scientific Reports*, 5, 5-10.
- a : <https://www.citepa.org/donnees-air-climat/donnees-gaz-a-effet-de-serre/secten/>



Situation sanitaire de la chênaie caducifoliée face aux risques biotiques et au changement climatique

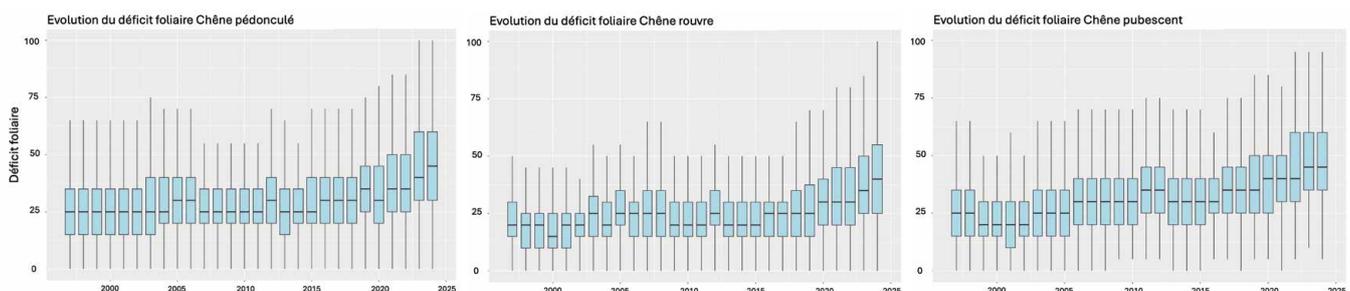
Avec le changement climatique, les chênes souffrent. Les déficits foliaires des houppiers et les mortalités augmentent de façon continue. L'entrée régulière sur le territoire de bioagresseurs exotiques accroît encore la menace. Aujourd'hui, le Département de la santé des forêts surveille particulièrement la punaise réticulée et le champignon *Bretziella fagacearum*. Plus que jamais, l'ensemble de la filière doit poursuivre sa mobilisation pour organiser cette surveillance.

En France, les chênes caducifoliés couvrent une très vaste partie du territoire forestier. Les chênes sessile et pédonculé sont l'essence principale des peuplements sur 4 millions d'ha. Leur volume sur pied représente 666 millions de m³, soit 24 % du volume total des arbres forestiers. Leurs usages sont multiples et parfois très symboliques comme la fabrication de tonneaux où s'affinent les plus grands vins du monde. Le prix du bois de chêne sur pied a doublé sur les 10 dernières années et est près de 3 fois supérieur au prix du bois toutes essences confondues. C'est dire l'importance patrimoniale, économique voire culturelle, des deux principaux chênes blancs français. Le chêne pubescent, troisième de ce groupe, est l'essence principale sur près de 1,4 million d'ha et est surtout concentré dans la moitié sud de la France. Ses enjeux économiques sont plus modestes, mais il est considéré comme essence d'avenir dans le contexte du changement climatique. Le chêne tauzin et chevelu, très minoritaires en France, et les chênes rouge, essence exotique, ne seront pas abordés ici.

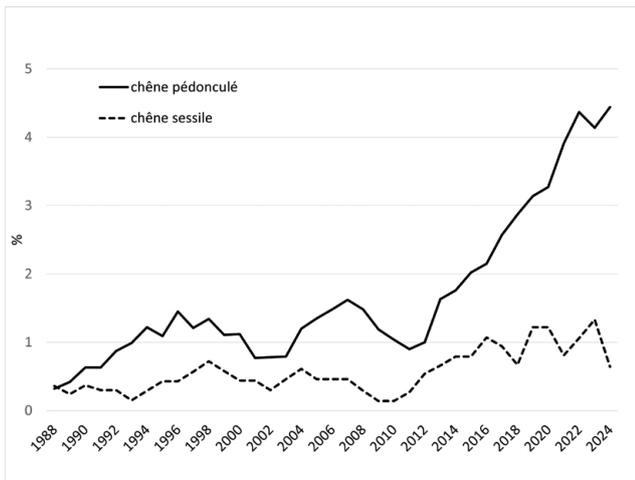
Cette prédominance des chênes caducifoliés justifie l'attention particulière portée par le Département de la santé des forêts (DSF) qui dispose d'une batterie d'indicateurs spatio-temporels permettant de suivre l'évolution de l'état de santé des arbres et des massifs à enjeux. Les agents biotiques, insectes ravageurs et champignons pathogènes, sont relevés pour estimer leur rôle sur la santé de ces essences.

Une situation qui se dégrade doucement depuis quelques années

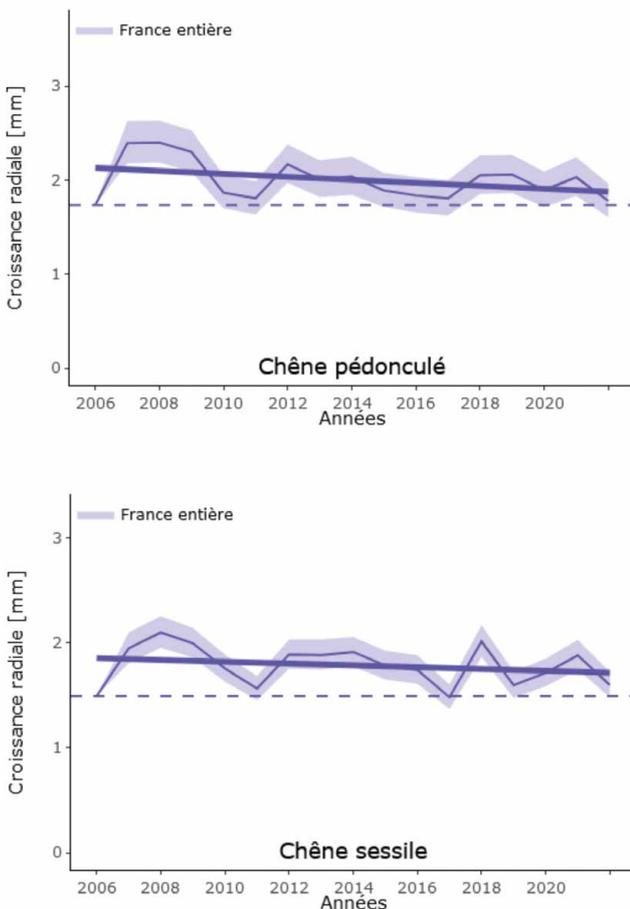
Les données du réseau systématique 16 x 16 km s'appuient sur 250 placettes de chênes caducifoliés où les mêmes arbres sont notés chaque année, soit environ 1230 pédonculés, 1460 sessiles et 960 pubescents. À l'instar de la majorité des principales essences du territoire national, ce dispositif national montre une lente, mais réelle augmentation du déficit foliaire des houppiers, notamment à partir de 2015, traduisant une détérioration de leur état de santé (figure 1).



↑ **Figure 1.** Évolution du déficit foliaire sur le chêne pédonculé, sessile et pubescent du réseau 16 x 16 km de 1997 à 2023. Seules les placettes contenant au moins 25 % de chênes sont comptabilisées (DSF)



↑ **Figure 2.** Évolution de la moyenne glissante sur 5 ans du nombre de placettes où les chênes pédonculés et sessiles sont majoritaires et comportant au moins un arbre mort



↑ **Figure 3.** Chronologie de croissance du chêne pédonculé et sessile en France de 2006 à 2022 (<https://inventif.ign.fr>)

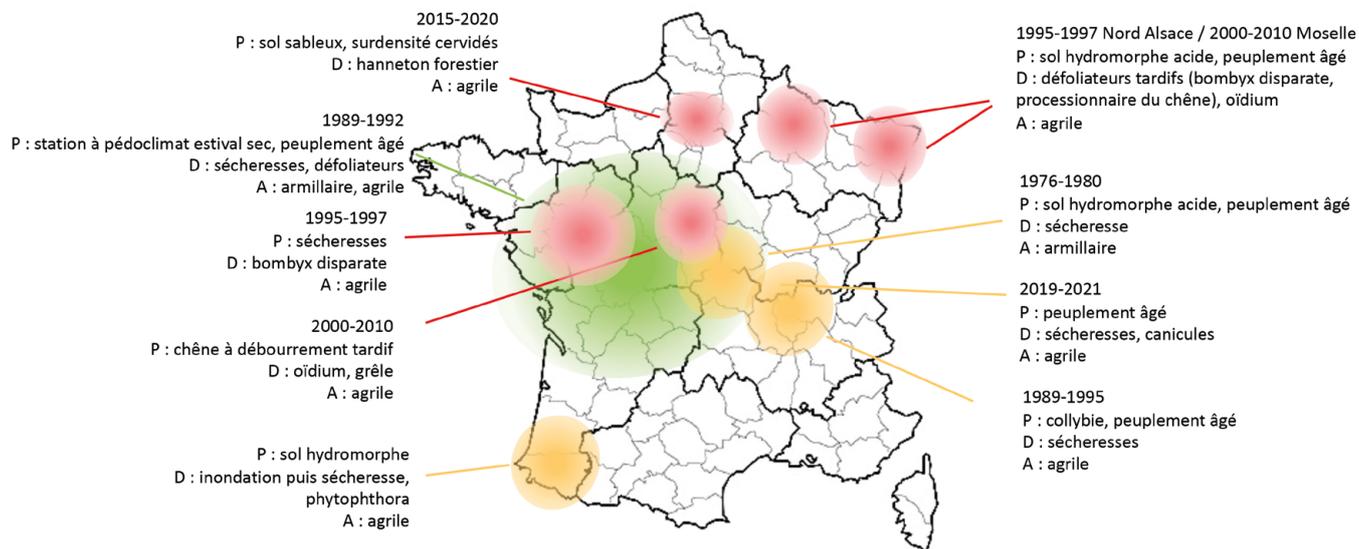
Les données de l'inventaire forestier de l'IGN montrent sensiblement la même tendance à la dégradation. Sur la période 2006-2022, sur la France entière, la croissance a diminué d'environ 12 % chez le chêne pédonculé, et 8 % chez le chêne sessile (<https://inventif.ign.fr> ; figure 3). Ce sont dans les GRECO Centre nord semi-océanique et Massif central que la diminution est la plus nette. La croissance est en revanche globalement stable chez le chêne pubescent. Par ailleurs, 5 % des chênes pédonculés ont une mortalité de branches supérieure à 25 % contre 3 % pour le chêne sessile. Enfin le volume de bois mort de moins de 5 ans augmente de façon significative sur la période 2008-2023 dans les principales grandes régions écologiques (<https://foret.ign.fr/mon-territoire>)

Mis en place en 2018, le bulletin sanitaire de l'ONF confirme les tendances générales montrées par le Département de la santé des forêts et l'IGN. Le taux de volume de produits accidentels de chêne sessile et pédonculé augmente depuis 2019 pour atteindre près de 25 % du volume total récolté début 2025. Cette progression est diffuse à l'échelle de tout le territoire mais est plus intense sur certaines agences : Berry-Bourbonnais mais aussi Vosges-Ouest, Picardie et Jura.

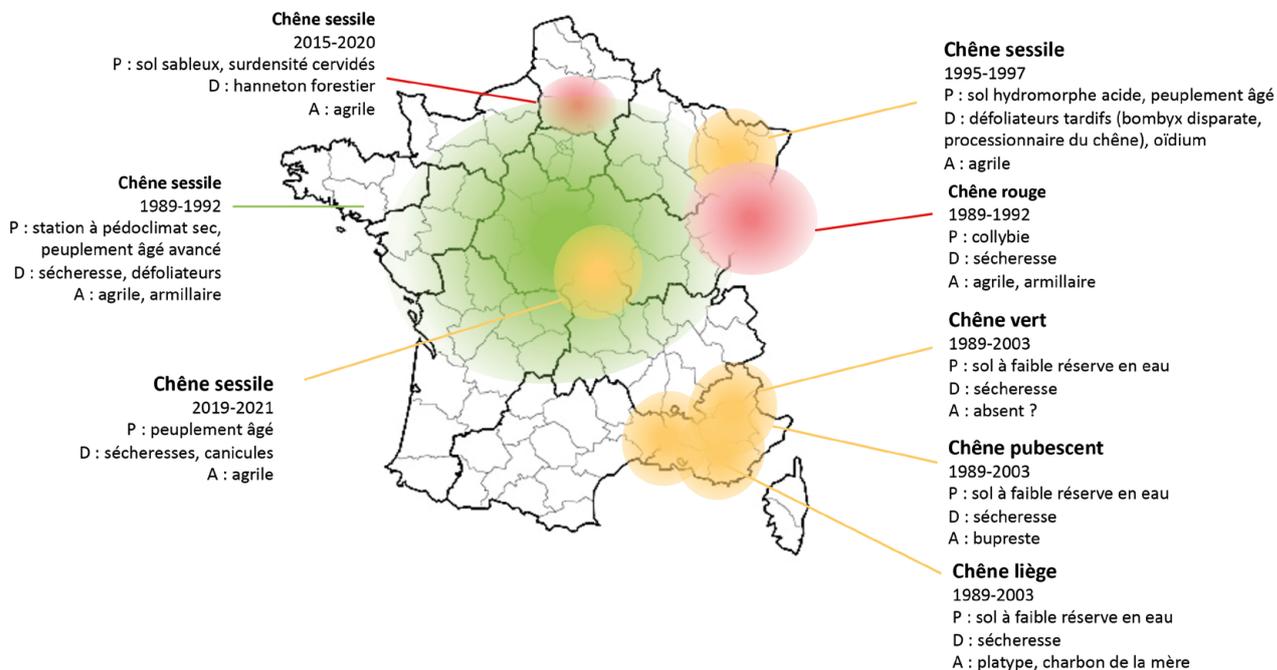
Des spots de dépérissements localisés

Derrière cette situation moyenne à l'échelle du territoire se cachent des disparités importantes. Pour le comprendre, il est nécessaire de faire le bilan de 35 années de suivi de l'état sanitaire des chênaies. Sur cette période, la dégradation de la santé des chênes est causée, non pas par un seul agent causal comme c'est le cas par exemple pour le frêne avec la chalarose, mais par des dépérissements, c'est-à-dire un ensemble de facteurs biotiques et abiotiques qui interagissent et se succèdent pour aboutir à une altération graduelle des arbres et une perte de croissance, voire une mortalité². La majorité des dépérissements ont eu lieu sur des chênes âgés et présents dans des sols à faible réserve en eau ou hydromorphes acides ayant subi durant 1 ou 2 ans d'intenses sécheresses et/ou de sévères attaques d'agents de défoliation (insectes ravageurs ou oïdium). Les arbres affaiblis par ces événements deviennent ensuite vulnérables à des bioagresseurs opportunistes comme les agriles ou l'armillaire (figure 4). À la lecture de ces facteurs cumulatifs, on comprend alors que les dépérissements sont localisés (spot) et temporaires. En effet, un retour à une pluviométrie normale ou un recul épidémique d'un bioagresseur conduit le plus souvent à une rémission totale ou partielle des arbres. Ainsi, le danger à long terme pour la chênaie viendra si le changement climatique favorise la récurrence de ces événements et notamment des sécheresses, principal facteur déclenchant de dépérissement, sans que les arbres aient le temps de s'adapter à ces nouvelles conditions climatiques.

Principaux dépérissements de chêne pédonculé



Principaux dépérissements autres chênes



↑ Figure 4. Principaux spots de dépérissement des chênes depuis 1989 avec les facteurs prédisposants (P), déclenchant (D) et aggravant (A). (Saintonge et al. 2023)

Une grande biodiversité de bioagresseurs, mais une minorité réellement impactante

Sur la période 2007-2024, environ 90 espèces ou genres d'insectes ravageurs et 70 agents pathogènes sont associés aux chênaies dépérissantes, manifestant ainsi une importante biodiversité. Cependant seule une faible minorité explique la majeure partie des problèmes sanitaires. Chez les insectes, les défoliateurs dominent très largement. La processionnaire (*Thaumetopoea processionea*) représente 28 % des mentions de problèmes entomologiques. Le bombyx (disparate, cul brun et à livrée), les Géométridés, la tordeuse verte, l'orcheste et le bupreste des branches représentent ensemble 40 % des mentions (figure 5 et 6). Enfin, bien que parfois très impactant à l'échelle d'une parcelle ou d'un massif, le hanneton forestier ou commun est impliqué dans 3 % des cas. Concernant les agents pathogènes, 85 % des signalements concernent l'oïdium du chêne : ce fort taux s'explique par le rôle prépondérant de cette maladie dans le dépérissement du chêne, mais aussi par le diagnostic visuel aisé (figure 7). Avec la collybie et l'armillaire, ils représentent à eux trois 90 % des problèmes pathologiques. Ainsi, seule une dizaine de bioagresseurs sont impliqués dans la majorité des dépérissements de chênes caducifoliés.

La menace des bioagresseurs exotiques

Les arbres forestiers sont constamment sous la menace de l'entrée et l'établissement de bioagresseurs exotiques sur le territoire. L'encre et le chancre du châtaignier, la graphiose de l'orme, la chalarose du frêne ou la pyrale du buis illustrent le danger qu'ils représentent avec de forts enjeux sociétaux, économiques et environnementaux. Plus de 50 % des problèmes sanitaires seraient d'origine exotique³. Les chênes n'échappent pas aux invasions de bioagresseurs. *Erysiphe alphitoides* et *E. quercicola* responsable de l'oïdium, sont deux champignons pathogènes d'origine asiatique⁴. Bien que cette maladie soit commune, voire acclimatée à nos forêts plus d'un siècle après son introduction, elle continue de causer des dommages importants (mortalité et perte de croissance) chez les semis et très jeunes peuplements⁵. Par ailleurs, l'oïdium reste certaines années un facteur déclenchant de dépérissement de chênes adultes quand la maladie survient après des attaques d'insectes ravageurs et/ou des épisodes de sécheresse.

Aujourd'hui, une vigilance accrue est portée sur *Corythucha arcuata*, la punaise réticulée. Originaire d'Amérique du Nord, cet hémiptère, appelé aussi tigre du chêne, a été détecté en Italie en 2000 et pour la première fois en France en 2017 dans le sud-ouest. Elle attaque tous les chênes caducifoliés et se propage progressivement vers le nord pour atteindre la Bourgogne-Franche-Comté en 2024. Après hibernation sous l'écorce, les adultes émergent au printemps et migrent vers les feuilles dont ils se nourrissent. Après la ponte de dizaines d'œufs par femelle, la



↑ Figure 5. Chenille de bombyx disparate (© F.X. Saintonge)



↑ Figure 6. Dégâts sur jeune chêne causé par le bupreste des branches (© F.X. Saintonge)



↑ Figure 7. Feutrage blanc et nécrose foliaire causés par l'oïdium du chêne (© F.X. Saintonge)

première génération émerge dès la fin juin, puis une deuxième en août et parfois une troisième en fin de saison de végétation. Les feuilles jaunissent et chutent prématurément. Agent de faiblesse dans son aire d'origine, il est nécessaire d'évaluer précisément son impact sur la chênaie européenne. Quatre points justifient cette vigilance : i- la récente introduction en France et donc l'absence de données sur l'effet cumulatif des attaques, ii- l'origine exotique de l'insecte qui interagit avec de nouveaux hôtes, iii- la rapide propagation sur le territoire, iv- de forts taux d'infestations observés localement.

Alors que l'impact de la punaise réticulée sur la santé des chênes européens reste à déterminer, celui de l'agent pathogène *Bretziella fagacearum* a été bien établi⁶. Ce champignon originaire des Etats-Unis, a un cycle biologique similaire à celui de la graphiose. Il est véhiculé par des scolytes porteurs de spores, pénètre dans les rameaux et se propage dans les vaisseaux du bois jusqu'aux racines. Son développement conduit à bloquer la circulation de la sève et par conséquent au flétrissement voire à la mortalité des arbres. La maladie est transmissible aux arbres voisins par greffe racinaire. Via des expérimentations menées aux Etats-Unis, nous savons que les chênes pédonculé, sessile et pubescent sont très sensibles : quasiment 100 % des arbres des trois espèces sont morts un an après leur inoculation artificielle. Les scolytes et nitidules qui véhiculent le champignon aux Etats-Unis ne sont pas présents en Europe, mais il est très probable que les scolytes européens, comme le scolyte intriqué, puisse jouer ce rôle dans nos chênaies. *B. fagacearum* est classé organisme de quarantaine en Europe. Cela signifie qu'il est soumis à une surveillance pour vérifier son absence. En cas de détection, des mesures sanitaires (délimitation des zones infestées, abattage et destruction d'arbres) doivent être appliquées pour l'éradiquer ou à défaut limiter sa propagation. La surveillance du territoire, en forêt ou hors forêt, est donc essentielle pour détecter le plus précocement possible cet organisme nuisible en cas d'entrée sur le territoire. Tout flétrissement de chêne suspect semblable à celui observé sur orme atteint de graphiose doit être signalé au DSF. Mais le meilleur moyen pour éviter ce risque majeur est de ne pas recourir à des importations de grumes de chênes non écorcées provenant des Etats-Unis et, pour y pallier, de privilégier l'utilisation de grumes d'origine européenne ou des imports de bois équarris⁷.

Pour prévenir l'effet du changement climatique, une enquête sur l'état du chêne par massif à enjeu

Il est difficile de prévoir l'avenir d'une essence dans un climat changeant. Néanmoins, les climatologues s'accordent à dire que les années chaudes et sèches comme celle de 2018 qui restent exceptionnelles aujourd'hui le deviendront beaucoup moins d'ici 30 ans. Par ailleurs, les sécheresses sont le principal facteur déclenchant de dépérissement du chêne, dépérissement toujours décalé de quelques années après le stress subi.

Évaluer le comportement des arbres après une forte sécheresse permet donc partiellement de prévoir le risque encouru par les chênaies dans le cadre du changement climatique. Etant donné la disparité spatio-temporelle de la dégradation des chênaies, il est pertinent de suivre leur état sanitaire par massif à enjeu. C'est sur ces faits bien établis que le DSF a réalisé une enquête nationale par massif pour établir leur état sanitaire avant que le stress hydrique provoqué par les années chaudes et sèches 2018-2019 ne se fasse ressentir sur la santé des arbres. 116 massifs ont été investigués en 2019-2020 et 72 000 arbres échantillonnés aléatoirement selon un maillage systématique ont été notés avec le protocole DEPERIS. La majorité des massifs contenaient 15 et 50 placettes géolocalisées de 20 arbres afin d'être le plus représentatif possible de l'état général du massif.

Conformément aux attendus, la santé des chênes dans les massifs échantillonnés est globalement bonne (figure 8). Sans aller dans le détail, les massifs dans le grand quart nord-ouest de la France présentent le meilleur état sanitaire. Les plus dégradés sont soit du fait de stress anciens et répétés (par exemple en Alsace, Franche-Comté ou Moselle), soit déjà la résultante des événements climatiques récents (dans l'Allier, l'Indre ou le Cher).



↑ **Figure 8.** État sanitaire de 116 massifs à enjeu de chênes en 2019-2020 selon le protocole DEPERIS (note A, B et C, sain ; D, dégradé ; E et F, très dégradé). La taille du camembert est proportionnelle au nombre d'arbres notés.

Après cet état des lieux initial de 2019-20, les chênes des 116 massifs seront réévalués 5 ans après, c'est-à-dire durant l'hiver 2024-2025. L'objectif est de retourner sur les mêmes placettes, voire de noter les mêmes arbres, pour minimiser le biais dû à l'échantillonnage. C'est en effet l'évolution entre ces deux périodes qui sera la plus informative pour savoir comment ont réagi les arbres et de façon plus globale les massifs après le stress hydrique de 2018-2019. Il est prévu de reconduire plusieurs fois cette enquête nationale sur un pas de temps similaire. Avec une stratégie différente, ce réseau fournira ainsi des données qui viendront renforcer celles du réseau européen 16x16 et de l'Inventaire forestier pour évaluer l'état de santé du chêne en France sous la menace du changement climatique et des agents biotiques.

Conclusion

À l'instar des autres essences métropolitaines, la situation sanitaire des chênes blancs se détériore avec localement des spots de dépérissements impactant fortement la gestion. Les évolutions à venir en lien avec le changement global (climat, bioagresseurs exotiques) vont probablement aggraver la situation durant les prochaines décennies. La particularité de ces essences est la longueur de leur cycle de développement ce qui constitue à elle seule un facteur de risque majeur. En conséquence, il va falloir adapter la sylviculture, voire substituer localement les chênaies caducifoliées par des essences au cycle de production plus court et plus résilientes face aux stress biotiques et abiotiques. Une surveillance, à la fois plus fine pour détecter précocement toute anomalie de l'état sanitaire, et plus globale pour évaluer l'ampleur du phénomène, s'impose donc. L'ensemble de la filière doit poursuivre sa mobilisation pour organiser cette surveillance, en tirer les conséquences et prendre les décisions les plus opportunes.

Claude Husson

Département de la santé des forêts, SDSPV, DGAL

François-Xavier Saintonge

Département de la santé des forêts, SDSPV, DGAL

BIBLIOGRAPHIE

- 1 : IGN (2024). Memento (édition 2024). Inventaire forestier national. 72 p.
- 2 : Saintonge FX, Nageleisen LM, Boutte B, Goudet M, Husson C, Piou D, Riou-Nivert P (2023). La santé des forêts – Diagnostic, prévention et gestion. Edition CNPF-IDF. 639 p.
- 3 : Robin C, Desprez-Loustau M-L (2018). Émergences de maladies chez les arbres forestiers : Définitions, concepts et recommandations. Revue forestière française, 70 (6), 569-575.
- 4 : Saintonge FX, Husson C, Goudet M, Auger-Rozenberg MA, Marçais B (2020). Les bioagresseurs invasifs dans les forêts françaises : passé, présent et avenir. Revue Forestière Française, 72 (2), 119-135.
- 5 : Barrès et al. (2024). Demographic and genetic impacts of powdery mildew in a young oak (*Quercus robur* L.) cohort, *Annals of Forest Science*, 81. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01259-2>
- 6 : Pinon J (2010). Flétrissement américain du chêne : quels risques sanitaires pour le chêne européen. *Le bois international*, 43, 10-12.
- 7 : Husson C, Goudet M, Dupérier S (2024). Importer des grumes de chênes d'Amérique du Nord présente un fort risque sanitaire pour la chênaie européenne. Point de vue, *Forestopic*. Accessible en ligne sur www.forestopic.com



Le fonctionnement hydrique des arbres sous sécheresses caniculaires

Sous l'effet des vagues de chaleur et des sécheresses, les arbres dépérissent. Il s'agit parfois de quelques branches mortes, mais il arrive aussi que des peuplements entiers meurent. Alors que se passe-t-il exactement chez les arbres qui dépérissent ?

Introduction

Les forêts dépérissent de plus en plus en France et dans le monde : mortalité de branches, diminution de la quantité et de la qualité du feuillage, descente de cime ou tout simplement mort des arbres. Une grande partie de ces dépérissements est liée aux épisodes de sécheresse et aux vagues de chaleur, amenés à s'intensifier avec le changement climatique. Les forestiers doivent donc adapter leur sylviculture. Pour cela, il est important de comprendre comment les arbres réagissent à ces épisodes climatiques extrêmes.

Que savons-nous du fonctionnement hydrique des arbres ? Que se passe-t-il lorsque l'eau vient à manquer ou que la chaleur est extrême ?

La réponse dépend des espèces d'arbres. Certaines ferment leurs stomates assez rapidement pour maintenir un état hydrique favorable et éviter l'embolie tandis que d'autres retardent cette fermeture pour conserver leur activité photosynthétique, quitte à s'exposer davantage aux risques d'embolie. De surcroît, lorsque la chaleur atteint des températures extrêmes, fermer les stomates ne suffit plus car la cuticule perd son caractère imperméable et l'eau s'échappe à travers. Regardons cela de plus près.

Les arbres et leur rôle de pompe hydraulique dans les écosystèmes forestiers

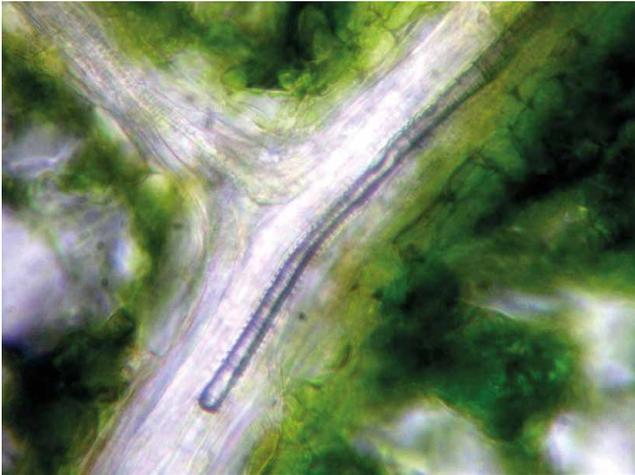
Les arbres sont capables de pomper l'eau du sol et de l'élever à des dizaines de mètres de hauteur, jusqu'aux feuilles. L'ascension de la sève brute se déroule dans l'aubier (xylème) via des tuyaux ou éléments conducteurs de sève formant ainsi une colonne d'eau. Cette eau est ensuite évaporée à travers de minuscules trous dans la cuticule imperméable des feuilles, appelés stomates. Elle s'évapore parce que la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère est moins élevée que celle contenue dans les feuilles. La transpiration foliaire

est le moteur de l'ascension de la sève brute. Elle génère des tensions dites « capillaires » dans les feuilles qui « pompent » sur la colonne d'eau dans les tuyaux. Avec la cohésion des molécules d'eau entre elles, ces tensions sont ensuite transmises jusqu'aux racines qui peuvent alors absorber l'eau du sol, mettant en mouvement toute la colonne d'eau.

Les feuilles utilisent également l'énergie solaire pour transformer le gaz carbonique (CO_2) contenu dans l'air en sucres (comme le glucose) grâce au processus de photosynthèse. Tout d'abord, l'eau des feuilles permet de rendre soluble le CO_2 qui est entré par les stomates et de former les sucres lors de la photosynthèse qui se déroule dans un milieu cellulaire aqueux : les chloroplastes. Ces sucres servent ensuite à couvrir les besoins énergétiques de la plante et à assurer sa croissance. Ils peuvent aussi être stockés sous forme d'amidon (polymère de glucose) en vue d'une utilisation ultérieure.

Pour résumer, un arbre qui transpire beaucoup est un arbre qui absorbe beaucoup de CO_2 , ce qui favorise la photosynthèse et donc sa croissance et la constitution de réserve.

Cependant, cette circulation de sève qui amène l'eau jusqu'aux feuilles peut s'arrêter brusquement si le climat devient trop sec. Lorsque la quantité d'eau dans le sol diminue, elle est moins facilement extractible par les arbres. C'est alors le signal de la régulation stomatique. Pour éviter les pertes en eau trop importantes, ils ferment progressivement leurs stomates. Mais lorsque la régulation stomatique est insuffisante ou que la sécheresse se prolonge, le pompage de l'eau et la circulation de la sève dans les arbres est enrayée. Ces dysfonctionnements hydrauliques se traduisent par la formation d'une bulle d'air dans les éléments conducteurs de sève : on parle d'un phénomène de cavitation aboutissant à une embolie du xylème (figure 1). La continuité hydraulique permettant l'ascension de la sève brute jusqu'aux feuilles est rompue par l'entrée de l'air dans la colonne d'eau. Ces embolies provoquent alors une mortalité des cellules par rupture symplasmique, c'est-à-dire la rupture de la continuité hydraulique le long des éléments



↑ **Figure 1.** Présence d'une bulle d'air dans une veinule d'une feuille de Noyer. La bulle crée une embolie gazeuse du xylème qui bloque la circulation de la sève.

Mourir de soif ou mourir de faim ?

En cas de déficit en eau, les arbres peuvent mourir de soif, mais aussi de faim. En effet, si les stomates se ferment pour conserver un statut hydrique favorable, le CO₂ ne pénètre plus dans la feuille et la circulation de la sève diminue. Cela réduit fortement l'activité photosynthétique et la formation de réserves carbonées. Le stockage de carbone dans le bois ou les tiges, son transfert des feuilles aux racines et la croissance des arbres sont également perturbés⁵. Pour autant, la respiration des cellules de l'arbre doit continuer pour assurer son fonctionnement métabolique, ce qui consomme davantage les réserves carbonées⁶. Or le débourrement au printemps, la défense face aux pathogènes et aux gels tardifs nécessitent la remobilisation de réserves carbonées. Les arbres sont donc progressivement affaiblis et font face à un grand dilemme : mourir de faim ou mourir de soif. Ils doivent trouver un compromis physiologique pour éviter les risques de rupture hydraulique tout en garantissant un nutrition carbonée favorable à la croissance. Mais, même si le problème d'épuisement des réserves carbonées peut aggraver le risque de mortalité des arbres en période de sécheresse sévère, c'est plutôt de soif que nos arbres meurent, à cause d'une rupture hydraulique de la colonne d'eau⁷.

conducteurs de sève. Ce processus peut entraîner la chute de feuilles ou d'aiguilles et le dessèchement de rameaux, de branches ou de parties de houppier.

L'embolie du xylème étant l'un des principaux mécanismes à l'origine de la mortalité des arbres lors des sécheresses¹, les stratégies de régulation stomatique et la résistance à l'embolie des espèces sont très étudiées¹⁻³. C'est ainsi que les chercheurs étudient le niveau de tension (pression négative) que le xylème peut supporter avant d'atteindre des seuils d'embolie critique : c'est la résistance (ou vulnérabilité) à l'embolie. Ils étudient aussi la marge de sécurité hydraulique dont dispose l'arbre, c'est-à-dire l'écart entre cette résistance à l'embolie et la tension de sève régulièrement subie par la plante dans son milieu.

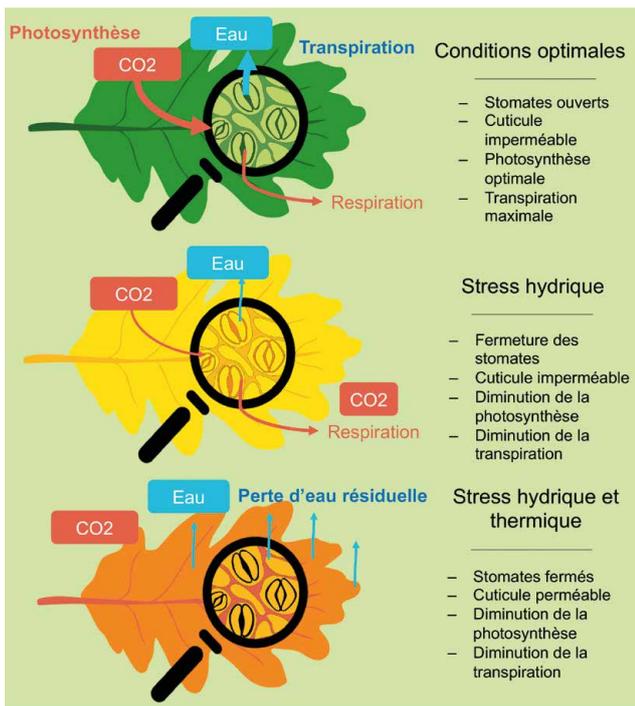
La capacité de l'arbre à réguler la fermeture stomatique et à accéder à l'eau grâce à sa profondeur d'enracinement sont également déterminants pour sa résistance à la sécheresse.

Les chercheurs ont pu montrer que les espèces des milieux arides ont une résistance à l'embolie plus importante que celles des milieux humides. Mais, l'écart entre cette résistance à l'embolie et la tension de sève régulièrement subie par les arbres dans leur milieu est similaire selon les différents types d'écosystèmes forestiers⁴. Les arbres se positionnent donc dans un compromis physiologique similaire face aux risques d'embolie.

Quelles sont les stratégies de résistance à la sécheresse utilisées par les arbres ?

Face aux stress hydriques, il existe deux stratégies : l'évitement (utilisée par exemple par le Pin sylvestre) et la tolérance (utilisée par exemple par le Chêne sessile)⁸. Ces deux stratégies diffèrent par la dynamique de fermeture et d'ouverture des stomates au cours d'une sécheresse. La stratégie d'évitement est une stratégie de conservation des ressources en eau dans les arbres : les stomates se ferment rapidement. Les essences qui utilisent cette stratégie sont moins résistantes à l'embolie et compensent donc avec une fermeture forte et précoce des stomates pour conserver leur statut hydrique. Elles ont parfois une plus grande marge de sécurité face à l'embolie mais s'exposent davantage à un épuisement de réserves carbonées.

A l'inverse, la stratégie de tolérance est une stratégie d'exploitation maximale des ressources en eau quitte à en perdre plus et à s'exposer aux embolies du xylème. Les stomates se ferment plus tard. Les essences qui utilisent cette stratégie ont l'avantage de maintenir une activité photosynthétique plus importante, surtout lorsque la sécheresse est modérée.



↑ **Figure 2.** Illustration des réactions des arbres au niveau des feuilles face aux stress hydrique et thermique.

Que se passe-t-il en cas de forte température estivale ?

Nous l'avons vu, le contrôle de la transpiration par la fermeture des stomates joue un rôle fondamental dans la gestion de la sécheresse par les arbres. Cependant, lorsque la sécheresse est accompagnée de très fortes chaleurs, la transpiration n'est plus complètement contrôlable par le niveau d'ouverture des stomates car l'eau peut passer directement par la cuticule des feuilles, devenue perméable (figure 2).

En temps normal, l'eau transpirée par les feuilles permet de les refroidir. Mais, si la température est extrême (> 40°C) et que les réserves hydriques du sol sont insuffisantes, les feuilles ne sont plus refroidies par la transpiration car les stomates sont fermés. Les températures élevées modifient alors les propriétés de la cuticule des feuilles qui devient perméable⁹. Les feuilles perdent donc l'eau restante par évaporation à travers cette cuticule. Ce phénomène pourrait déclencher des ruptures de la continuité hydraulique liée à la formation d'une bulle d'air dans les éléments conducteurs de sève¹⁰. Et lorsque cette perte d'eau n'est pas compensée par un apport d'eau du sol, cela provoque la déshydratation critique des feuilles qui se mettent à se dessécher, brunir et tomber.

Le problème peut s'aggraver avec l'action de divers pathogènes

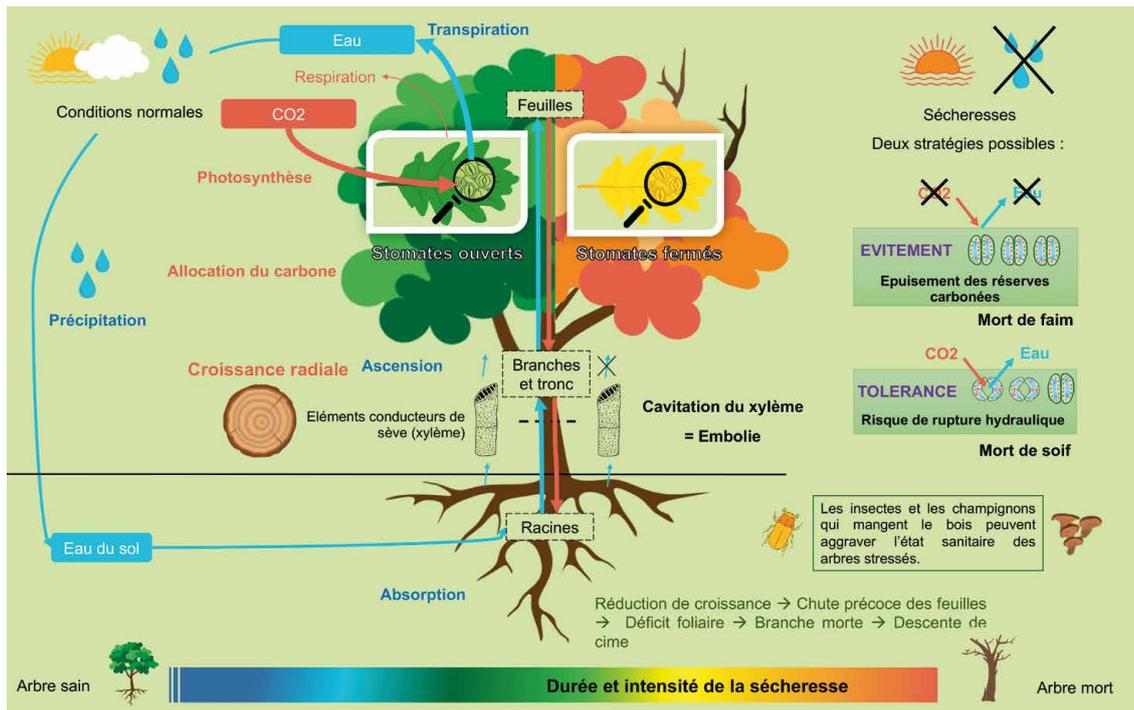
Les sécheresses et les vagues de chaleurs déclenchent un ensemble de réactions complexes chez les arbres, des racines aux feuilles. Les arbres sont subitement ou progressivement affaiblis selon la durée, l'intensité et la fréquence de ces stress, ouvrant la porte à des parasites de faiblesse¹¹. Ces insectes et champignons pathogènes peuvent coloniser et détériorer les éléments conducteurs de sève et l'arbre épuise ses réserves pour se défendre. Ces attaques peuvent donc accélérer des phénomènes de dépérissement et aboutir à sa mort.

Conclusion

Nous pouvons donc retenir que les sécheresses et les vagues de chaleurs entraînent conjointement (figure 3) :

- La baisse de croissance des peuplements.
- La fermeture des stomates plus ou moins importante selon l'espèce pour conserver l'eau dans l'arbre.
- Le ralentissement de la photosynthèse par manque de CO₂ entrant dans les feuilles.
- La stimulation de la respiration cellulaire et l'épuisement des réserves carbonées.
- La perte d'eau supplémentaire à travers la cuticule des feuilles à cause des températures caniculaires.
- La rupture hydraulique de la colonne d'eau reliant les racines aux feuilles, puis l'atmosphère.
- Des événements de mortalité aggravés, accentués et accélérés par l'action de divers pathogènes.

De nombreuses avancées scientifiques donnent maintenant des clés pour comprendre et anticiper les effets du réchauffement climatique sur les écosystèmes forestiers. Des efforts restent à produire pour améliorer nos connaissances, pour transférer ces connaissances, et apporter des solutions sylvicoles (gestion de la densité, mélange d'essences) pour adapter nos forêts aux défis climatiques futurs.



← **Figure 3.** Schéma du processus de dépérissement lié au dysfonctionnement hydrique des arbres : sous conditions normales (à gauche) et sous condition de sécheresse (à droite).

Remerciements

Nous remercions vivement la Région Centre – Val de Loire pour son soutien et le financement du programme Ambition Recherche et de Développement SYCOMORE (<https://www.sycomore-cvl.fr/>). Nous remercions également l'Office National des Forêts pour son soutien financier à travers la convention ONF – INRAE « Régénération, croissance et production des forêts de plaine ». Ce travail a été réalisé en lien avec le dispositif OPTMix en Forêt d'Orléans (<https://optmix.efno.fr>).

Théo Javoy
INRAE, Unité de recherche EFNO
Philippe Balandier
INRAE, Unité de recherche PIAF
Hervé Cochard
INRAE, Unité de recherche PIAF
Sandrine Perret
INRAE, Unité de recherche EFNO
Thomas Perot
INRAE, Unité de recherche EFNO

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Anderegg WRL, Klein T, Bartlett M, et al (2016) Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 113, 5024-5029, <https://doi.org/10.1073/pnas.1525678113>
- 2. Chen Z, Li S, Wan X, Liu S (2022) Strategies of tree species to adapt to drought from leaf stomatal regulation and stem embolism resistance to root properties. *Frontiers in Plant Sciences*, 13 :926535, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.926535>
- 3. Lens F, Tixier A, Cochard H, et al (2013) Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. *Current Opinion in Plant Biology*, 16, 287-292, <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2013.02.005>
- 4. Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, et al (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491, 752-755, <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- 5. Rehschuh R, Rehschuh S, Gast A, et al (2022) Tree allocation dynamics beyond heat and hot drought stress reveal changes in carbon storage, belowground translocation and growth. *New Phytologist*, 233, 687-704, <https://doi.org/10.1111/nph.17815>
- 6. Adams HD, Guardiola-Claramonte M, Barron-Gafford GA, et al (2009) Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 106, 7063-7066, <https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106>
- 7. Adams HD, Zeppel MJB, Anderegg WRL, et al (2017) A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology and Evolution*, 1, 1285-1291, <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0248-x>
- 8. McDowell N, Pockman WT, Allen CD, et al (2008) Mechanisms of plant survival and mortality during drought : why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178, 719-739, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- 9. Billon LM, Blackman CJ, Cochard H, et al (2020) The DroughtBox : A new tool for phenotyping residual branch conductance and its temperature dependence during drought. *Plant, Cell & Environment*, 43, 1584-1594, <https://doi.org/10.1111/pce.13750>
- 10. Cochard H (2021) A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves. *Peer Community Journal*, 1, 36, <https://doi.org/10.24072/pcjournal.45>
- 11. Saintonge F-X, Nageleisen L-M (2023) La santé des forêts : diagnostic, prévention et gestion, 2e éd., actualisée et enrichie. Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, département de la santé des forêts CNPF-IDF, Paris



Le drone : une nouvelle technologie qui intègre progressivement la boîte à outils du forestier

Estimer les volumes de chablis après tempête, constater les dégâts d'avalanche sur les infrastructures, déterminer précisément le nombre de plants nécessaires pour un chantier de plantation : ces exemples illustrent la diversité des missions pour lesquelles l'ONF peut recourir aux drones. Jérôme Bock et Fabrice Coq, animateurs du groupe national sur l'usage du drone à l'ONF, reviennent pour nous sur l'historique du développement de cette technologie dans notre établissement ainsi que sur les applications actuelles et futures pour les forestiers.

Le drone à l'ONF, une histoire ancienne...

C'est à l'été 1997 que le Département des Recherches Techniques de l'ONF a réalisé les premiers tests d'acquisition d'images à l'aide d'une « caméra volante ». Il s'agissait alors d'un mini-hélicoptère radiocommandé de 35 kg, capable d'emporter 8 kg de matériel : caméra et système GPS. Déjà, la problématique consistait à réaliser des orthophotographies (images rectifiées pouvant être géopositionnées dans un référentiel géographique) au-dessus d'un peuplement dépérissant de La Hardt en Alsace.

En 2012, le Département Recherche Développement et Innovation de l'ONF (RDI) adhère au club « Yellowscan » pour soutenir cette start-up dans le développement d'un des premiers LIDAR léger (< 2 kg) embarquable dans un drone, permettant de produire une image 3D à partir d'impulsions laser. À l'époque, les tests menés en Chartreuse ont permis de valider cette technologie innovante. Toutefois des détails dans la géométrie du signal nécessitaient encore quelques ajustements.

Entre 2015 et 2017, les services Bois (DCBS) et RDI ont constitué un groupe de travail et ont lancé un appel à projets pour effectuer des tests pilotes afin d'évaluer le niveau de maturité des cas d'usage du drone en forêt. Parmi les 16 projets proposés, 9 ont été retenus, mais seulement 4 ont pu aboutir en raison de contraintes techniques ou réglementaires.

Au cours des années 2018-2019, les directions territoriales (DT) Centre Ouest Aquitaine et Seine-Nord s'équipent de drones et forment une dizaine de télépilotes. Dès lors les projets foisonnent avec plus de 150 survols enregistrés, principalement pour des missions d'actualisation d'orthophotos à haute résolution.

En 2020, la DT Midi-Méditerranée forme 2 télépilotes. La Guadeloupe, la Guyane et l'Agence travaux de la DT Grand Est s'équipent également. Puis en 2022 c'est au tour de la DT AURA de former 2 télépilotes pour des usages spécifiques et d'équiper l'ensemble des UT d'un drone léger pour des usages simples. Pendant ce temps, d'autres DT font le choix de l'externalisation et acquièrent également de l'expérience en acquisition d'images auprès de prestataires, pour des missions nécessitant des capteurs ou des compétences spécifiques.

Le « groupe national sur l'usage du drone à l'ONF » est constitué en 2021, avec une coanimation Direction Forêts et risques naturels DFRN (F. Coq) et RDI (J. Bock). Ses réflexions conduisent à la production de synthèses, à des cahiers des charges ainsi qu'à des guides juridiques et techniques qui sont diffusés sur un groupe Chlorofil. Des retours d'expérience sont formalisés afin de mutualiser les acquis et les bonnes pratiques de cas d'usages réussis ou ratés.



↑ **Figure 1.** Télépilote faisant décoller son drone catégorie spécifique (Mavic3 Enterprise) pour une acquisition d'orthophotos.

Un séminaire organisé à Fontainebleau pose les bases d'une stratégie nationale Drone, qui sera validée sous forme d'une instruction le 9 mai 2023 (INS-23-T-109).

Cette stratégie nationale impulse dès lors une dynamique de développement des drones. Elle instaure aussi une gouvernance pérenne (le réseau national drone) et fixe le cadre de développement de l'usage du drone au sein de l'établissement : contexte réglementaire et éthique, cas d'usages, accompagnement de l'innovation, organisation matérielle et humaine.

Un réseau de télépilotes étendu

Aujourd'hui, le réseau est riche de plus d'une centaine de télépilotes (mais avec seulement... 4 femmes). Environ 25 d'entre eux disposent d'un Certificat d'Aptitude Théorique de Télépilote pour des missions en **catégorie spécifique** : ils sont autorisés à réaliser des vols sans contact visuel avec leur drone, ils peuvent utiliser des drones lourds (supérieur à 250 g) qui permettent d'emporter une plus grande variété de capteurs, utilisés le plus souvent pour la production d'orthophotos (figure 1). Les autres télépilotes disposent d'une habilitation pour des missions dites de **catégorie ouverte**, où le drone reste à portée de vue. Il s'agit le plus souvent de missions de reconnaissance simples telles que l'évaluation des risques résiduels par les services RTM ou des diagnostics qualitatifs, (notamment liés au dépérissement) sur les UT de la DT AURA.

Il n'y a pas pour l'instant à l'ONF de télépilotes « certifiés » pour des missions à risques, sur de longues distances (à plus de 1 km). Pour rappel, l'utilisation d'un drone personnel dans le cadre professionnel est à proscrire : la responsabilité de l'ONF et celle de l'agent sont engagées.

Une flotte de drones variée

L'ONF dispose d'une centaine de drones. Une vingtaine de machines de ce pool est de type professionnel et donc adapté pour des missions spécifiques : il s'agit de machines de plus de 250 g jusqu'à près de 9 kg, essentiellement des drones de la gamme des Phantom IV, Mavic3 Enterprise ou Matrice (coût unitaire variant de 5 à 15 k€). Ils sont généralement équipés de capteurs optiques classiques (photos, caméras). Pour certains usages spécifiques comme la détection de points chauds dans le cadre de la DFCI ou pour la détection de dépérissements, l'ONF s'est également équipé de quelques capteurs thermiques ou multispectraux (capteurs infrarouges associés aux capteurs rouge, vert, bleu classiques). Les services de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) ont également investi dans un LIDAR miniature de type Yellowscan Mapper+ pour des usages très spécifiques de suivi de mouvements de terrain. Pour des besoins de positionnement à très haute précision (< 10 cm), certains drones sont équipés de GPS de haute précision.

La plupart des autres drones disponibles à l'ONF (environ 80 unités) sont des machines adaptées à des usages simples en catégorie ouverte. Il s'agit de drones de moins de 250 g, de type mavic2 ou 3, dont le coût est inférieur à 1000 €. Ils sont équipés de capteurs optiques classiques permettant l'acquisition d'images avec une résolution suffisamment bonne pour réaliser des diagnostics qualitatifs fins.

De nombreux usages du drone en forêt, certains plus matures que d'autres

La production d'orthophotos à jour représente la majorité des usages à l'ONF. Pour cet usage, le plan de vol du drone est programmé en amont par le télépilote en vue de réaliser des séries d'images en optimisant leur recouvrement selon un scénario de vol en catégorie spécifique. Ce plan de vol est suivi en mode autonome par le drone grâce à son système GPS. Un logiciel de traitement d'images (Métashape) permet ensuite de trouver des points homologues dans les séries d'images et de recomposer une image cohérente d'un point de vue géométrique. L'intérêt du drone réside dans sa réactivité et sa capacité à fournir rapidement (quelques jours après le survol), une image cohérente géométriquement avec nos référentiels, assortie d'une très bonne résolution de 5 à 10 cm. Toutefois les survols de drones ne permettent de couvrir que de faibles surfaces (quelques centaines d'hectares) pour un coût humain et matériel élevé. Or, tous les trois ans, l'IGN met à disposition gratuitement des orthophotos acquises par avions, qui, avec une résolution de 25 cm, permettent de répondre à la plupart des besoins à l'ONF. Avant de commander une mission drone, il est donc recommandé de vérifier que les dernières orthophotos de l'IGN ne permettent pas de répondre au besoin.

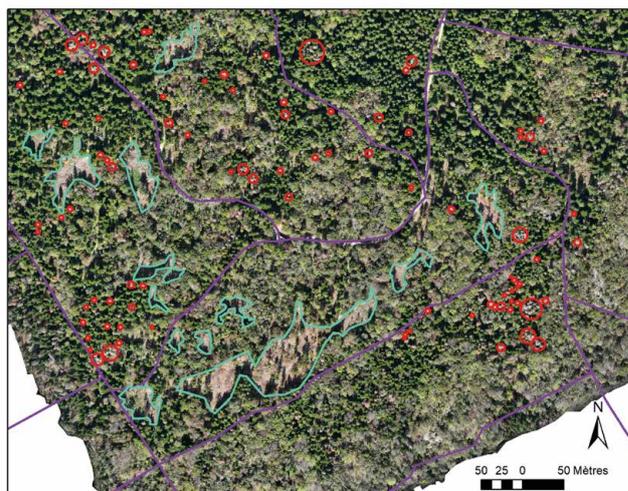
Attention

Comme les drones volent plus bas que les avions, ils permettent d'obtenir des orthophotos de meilleure résolution que celles mises à disposition par l'IGN. Les détails sont mieux visibles, le grain et le piqué de l'image sont meilleurs. Attention cependant : une telle qualité implique d'avoir des images très lourdes, avec de fortes conséquences sur l'infrastructure de traitement et sur les possibilités de stockage. Il est donc conseillé, lorsque c'est possible, de travailler avec des images dont la résolution est dégradée à 25 cm même si elles ont été acquises à une résolution de 5 cm. Cette résolution de 25 cm répond à la plupart des besoins sur le terrain.

Néanmoins, les drones de l'ONF permettent une mise à jour rapide des orthophotos. Celles-ci sont ensuite le plus souvent utilisées pour réaliser de la photo-interprétation afin d'estimer, délimiter et localiser précisément des surfaces d'intérêt et croiser les informations avec les référentiels ONF (parcellaire, UG, relevés GPS). Il n'est pas toujours facile d'obtenir automatiquement des données dendrométriques à l'aide d'un drone. Ainsi, il est par exemple possible de délimiter automatiquement des zones impactées par des dégâts de type chablis ou dépérissement (voir figure 2 et encadré 1). En revanche, il n'existe pas de méthode pour quantifier précisément le nombre d'arbres endommagés et encore moins les volumes impactés. Ces estimations dendrométriques sont généralement faites à « dire d'expert », basées sur la relation entre surfaces impactées et les densités ou volumes constatés localement.

Les orthophotos drones sont maintenant utilisées en routine au sein de certaines agences travaux pour cartographier, dimensionner, organiser puis réceptionner des chantiers forestiers. Par exemple, l'agence travaux de la DT Grand-Est a développé des solutions permettant de proposer des schémas numériques de plantations aux TFT qui, une fois validés, peuvent être importés dans les systèmes GPS des ouvriers ou des engins pour une localisation précise et une implantation optimisée. Des gains de productivité de l'ordre de 30 % sont constatés grâce à une meilleure estimation des surfaces, des linéaires et des quantités de plants, ainsi qu'une réduction du temps de localisation des plants ou des surfaces à travailler¹.

Un autre usage fréquent du drone est l'utilisation en mode « œil déporté » pour des diagnostics qualitatifs. Il s'agit de faire voler le drone au-dessus de la végétation, afin de prendre du recul et ainsi évaluer une situation. Par exemple, cela peut consister en l'appréciation de l'ampleur d'un dépérissement sur une parcelle, l'évaluation des risques résiduels à la suite d'un aléa, ou pour avoir une vision rapide de l'état d'ouvrages (figure 3) ou une vision d'ensemble d'un chantier avant/après intervention.



↑ **Figure 2.** Extrait de l'orthophoto drone à résolution de 25 cm en Forêt Communale de Miribel-les-Echelles (38), avec les limites d'Unités de Gestion (en violet), les trouées délimitées par photo-interprétation (en bleu) et les arbres scolytés (cercles rouges). La localisation et la caractérisation des surfaces affectées par les scolytes ont été réalisées en 2,2 jours-homme sur les 250 ha de forêt ; ce qui comprend : l'acquisition d'images par drone (1 jour-homme), la production d'orthophoto (0,5 jour-homme), la photo-interprétation (0,2 jour-homme) et la validation terrain (0,5 jour-homme).



↑ **Figure 3.** Le survol drone de l'avalanche du Tabuchet – commune de La Grave (38) le 11/2/2021 – permet notamment de constater que la conduite d'eau potable a été recouverte par un dépôt de neige. Une orthophoto précise a également été réalisée pour localiser l'emprise de l'avalanche.

Ces exemples illustrent parfaitement l'usage optimal que nous pouvons avoir avec des drones de catégorie ouverte, qui permettent de prendre des images rapidement tout en gardant le drone à vue. Les images peuvent être visionnées directement sur site, pour un diagnostic de terrain complémentaire. Elles peuvent également être archivées et valorisées dans un rapport pour une programmation de travaux, une réception de chantier ou pour des besoins de communications auprès de nos partenaires. Généralement, ces images ne nécessitent pas de post-traitement. Compte tenu de la faible qualité des systèmes de positionnement embarqués, il est toutefois difficile de disposer de données de position ou d'estimation de surface précises.

Pour de tels besoins, il est nécessaire d'avoir recours à du matériel et des traitements très spécifiques, conçus pour l'acquisition de données très précises et permettant d'obtenir des quantifications de surfaces ou de volumes fiables. Le besoin de l'UT Tarentaise-Vanoise de connaître la localisation des zones de chablis et les volumes impactés par une tempête en novembre dernier en est une bonne illustration (voir encadré). Ce matériel est tout aussi adapté lorsque le RTM souhaite apprécier des surfaces ou des volumes déplacés à la suite d'un aléa : l'utilisation de drones munis de systèmes de localisation GPS de type RTK permet une précision géométrique de quelques centimètres. Équipés de capteurs de qualité et pouvant voler à faible altitude, ils disposent d'une résolution de 5 cm (voire moins).

Les logiciels spécifiques de post-traitement permettent ensuite la mise en corrélation des images et la création de cartes de modelé du sol avec une résolution et une précision centimétrique nécessaire aux suivis fins des mouvements de terrain.

Une animation technique, pilotée par RDI, est dédiée au développement de cas d'usage innovants de drones. Il est en effet primordial d'organiser les modalités de tests et de formaliser des retours d'expérience pour être en mesure de décider de l'intérêt du déploiement de ces usages. Une documentation dédiée^{a,b}, régulièrement actualisée, décrit ces cas d'usage et leur niveau de maturité. Le tableau extrait de cette note propose une synthèse des usages du drone ayant cours à l'ONF (tableau 1).

Utilisation combinée du drone et du LIDAR HD pour estimer les volumes de chablis après tempête

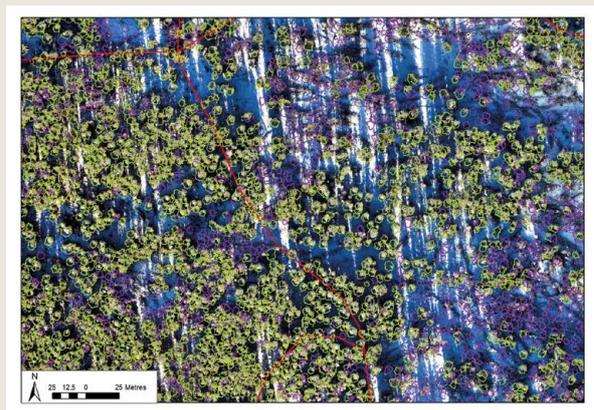
Le 21 novembre 2024, une tempête avec des vents de plus de 150 km/h a balayé les crêtes des Alpes, causant de nombreux chablis. La forêt communale des Allues, dans l'unité territoriale Tarentaise-Vanoise a été particulièrement touchée. Compte tenu des difficultés de cheminement et des surfaces potentiellement affectées, l'UT et la RDI ont testé une méthode innovante pour délimiter, localiser et estimer les dégâts de chablis, étape nécessaire pour établir une stratégie de commercialisation des bois. L'équipe de dronistes de la DT AURA s'est mobilisée pour réaliser un plan de vol de la forêt une semaine après la tempête. Puis le service SIG a produit les orthophotos et des Modèles Numériques de Surface (MNS) à l'aide d'un logiciel spécifique de corrélation d'images issues de drones. Grâce à une adaptation de la chaîne de traitement LIDAR, la RDI a détecté les couronnes et les apex des arbres ayant résisté à la tempête. Puis, après un recalage géométrique (les données drones avaient 1 à 3 m de décalage par rapport au LIDAR), un croisement d'informations a été réalisé entre les couronnes des arbres détectées dans le LIDAR HD d'août 2022 et celles détectées dans les images récentes (figure 4). Lorsque les couronnes des arbres de 2022 n'avaient pas de correspondance avec celles des arbres détectées en 2024, les arbres ont été considérés chablis à la suite des dégâts de tempête.

Dès lors, il ne restait plus qu'à déduire le volume de bois correspondant à ces arbres manquants. L'estimation des volumes par parcelle a été réalisée par croisement avec les cartes dendrométriques du LIDAR HD, en appliquant la relation suivante :

Volume = $G_{\text{lidar}} \times H_{0_{\text{lidar}}} \times F \times \text{Taux_couvert_chablis}$
 où G_{Lidar} et $H_{0_{\text{lidar}}}$ sont respectivement la surface terrière et la hauteur dominante modélisée par LIDAR, F le coefficient de forme moyen calculé à partir des

relevés de mesures de volume Emerge sur les Epicéas de la Direction Territoriale AURA ($F=0.45$). Ainsi le volume de chablis a été estimé à environ 30 000 m³ bois fort. Cela correspond assez bien aux estimations « à dire d'expert » du TFT (entre 20 et 25 000 m³ commercial).

Dans cet exemple, là où le drone léger n'aurait permis qu'un vague diagnostic qualitatif et quelques images de communication, le drone spécifique équipé de capteurs et d'un GPS de précision a permis d'obtenir (en plus) la localisation des principales zones de chablis et une estimation des volumes impactés par la tempête.



↑ **Figure 4.** Traitement d'une orthophoto issue d'images acquises par un drone spécifique, équipé de capteurs et GPS de précision. Les couronnes vertes correspondent aux arbres détectés en 2022 sur les MNS du LIDAR HD et qui sont toujours détectés sur les MNS issus des images 2024, prises après la tempête. Les couronnes violettes correspondent aux arbres disparus entre 2022 et 2024. Le parcellaire est tracé en rouge.

	Usages matures	Usages à approfondir avant déploiement		Usages à geler	Externalisation possible ou à privilégier
	A déployer	Priorité 1	Priorité 2	Pas d'investissement	
Communication	Prises de vues, films				Films scénarisés
Forêt et espaces naturels	Œil déporté, sans traitement d'image Localiser et quantifier les dégâts forestiers (chablis, arbres dépérissants...)	Localiser et cartographier des habitats naturels, Opérations de radiotracking d'espèces patrimoniales, Apprécier la quantité de fructification dans les arbres, Utilisation de caméras thermiques pour localiser ou compter de la faune patrimoniale		Utilisation de caméras thermiques pour localiser ou compter le grand gibier, Cartographie de variables dendrométriques	
Risques naturels	Œil déporté, sans traitement d'image, Cartographier l'ampleur d'un aléa (avalanche, chute de blocs, plage de dépôts...)	Détecter des mouvements de terrain : surveillance d'ouvrages, de falaises, de mouvements de terrains, de dunes.	Localisation des embâcles et quantification, Suivi écobuage et brûlage dirigé, Contrôle des Obligations légales de débroussaillage Détection de points chauds, avec risque de reprise d'incendie		
Travaux	Œil déporté, sans traitement d'image, Réaliser une réception de chantier ou préparer un chantier	Diagnostics de jeunes peuplements avant intervention, Transport de matériel sur des chantiers difficiles d'accès.	Elagage en bordure de ligne électrique	Détection de faune devant les engins de travaux forestiers pour éviter les collisions, Largage de semis ou de plants, Récolte de graines ou d'échantillons dans les arbres.	Traitements phytosanitaires

↑ **Tableau 1.** Tableau de synthèse des cas d'usages des drones à l'ONF et de leur priorité de déploiement

Perspectives

Porté initialement par une poignée de passionné.e.s, l'usage du drone s'est développé et s'est rapidement diversifié à l'ONF. Des cellules spécialisées se sont constituées avec des télépilotes et des géomaticiens. Elles ont montré la pertinence de certains usages. Le passage en production de ces usages matures nécessite maintenant de mutualiser les modes opératoires, de réfléchir à l'organisation des moyens et matériels pour que les bonnes pratiques essaiment dans d'autres régions et que l'usage du drone soit parfaitement opérationnel.

Dans quelques années, le drone léger (catégorie ouverte) pourrait être un outil dans la panoplie du TFT, au même titre que son smartphone, pour des missions de reconnaissance simple, pour approcher des zones difficiles d'accès, ou pour l'aider dans ses expertises en prenant un peu de hauteur. Les drones plus lourds (catégorie spécifique) intégreront de façon systématique certains processus métiers qui nécessitent une forte réactivité, tels qu'actualiser des portions d'orthophotos fournies par l'IGN, la préparation ou réception d'un chantier, la caractérisation d'aléas liés aux risques naturels. Quant au suivi des peuplements forestiers, il pourra s'appuyer sur une synergie de sources de données issues de télédétection, de satellites, d'avions et de drones. Il y aura assurément bien d'autres cas d'usages ; qu'ils soient en cours d'expertise, qu'ils se dessinent à peine, ou que nous n'en ayons pas encore idée aujourd'hui : le drone fera partie intégrante de la boîte à outils du forestier.

Remerciements

Les auteurs remercient le groupe de travail national des télépilotes de l'ONF, le réseau télépilote et géomatique de la DT AURA et l'UT Tarentaise-Vanoise pour le cas d'usage du drone ayant permis d'évaluer les chablis en forêt communale des Allues (73), ainsi que Sébastien Macé pour la relecture de l'article.

Jérôme Bock

ONF – Pôle Recherche, Développement et Innovations, DT Auvergne Rhône-Alpes

Fabrice Coq

ONF - Chargé de mission national aménagement et télédétection

BIBLIOGRAPHIE ET LIENS

• 1 : Bock J, Henry C, Daviller S, Somma L, Pailloux G (2024) Utiliser le drone et le GPS de précision pour optimiser les opérations de plantations. Les Rendez-Vous techniques de l'ONF, 80, 26-29.

• a : fiches retours d'expériences disponibles sur le groupe chlorofil : <https://chlorofil.talkspirit.com/#/1/drives/drones?clip=all&type=drive>

• b : 9200-23-GUI-GFM-003 - Les cas d'usages des drones à l'ONF



Lutte contre les espèces exotiques envahissantes dans la Réserve biologique intégrale des Hauts de Bois de Nèfles sur l'île de La Réunion

Sur l'île de La Réunion, lutter contre les espèces exotiques envahissantes est indispensable pour préserver les forêts. Mais cette lutte est acharnée, et pour obtenir un résultat satisfaisant, il faut agir avec méthode. Cet article présente le travail effectué par les équipes de l'ONF dans la Réserve biologique intégrale des Hauts de Bois de Nèfles, l'un des derniers vestiges de forêt tropicale de montagne de la côte Ouest de l'île.

Introduction

Les espèces exotiques envahissantes sont l'une des principales causes de l'érosion de la biodiversité mondiale. Les îles océaniques isolées telles que La Réunion sont particulièrement vulnérables aux phénomènes d'invasions biologiques qui constituent actuellement la menace la plus importante pour la survie des écosystèmes naturels insulaires.

À La Réunion, les invasions par des plantes introduites concernent l'ensemble des milieux naturels. Pour conserver la biodiversité et éviter l'homogénéisation des paysages, l'ONF lutte activement contre les espèces exotiques envahissantes dans les forêts publiques depuis 1980. Cette lutte active peut amener l'ONF à déroger à la règle de gestion en libre évolution dans certaines Réserves biologiques intégrales (RBI).

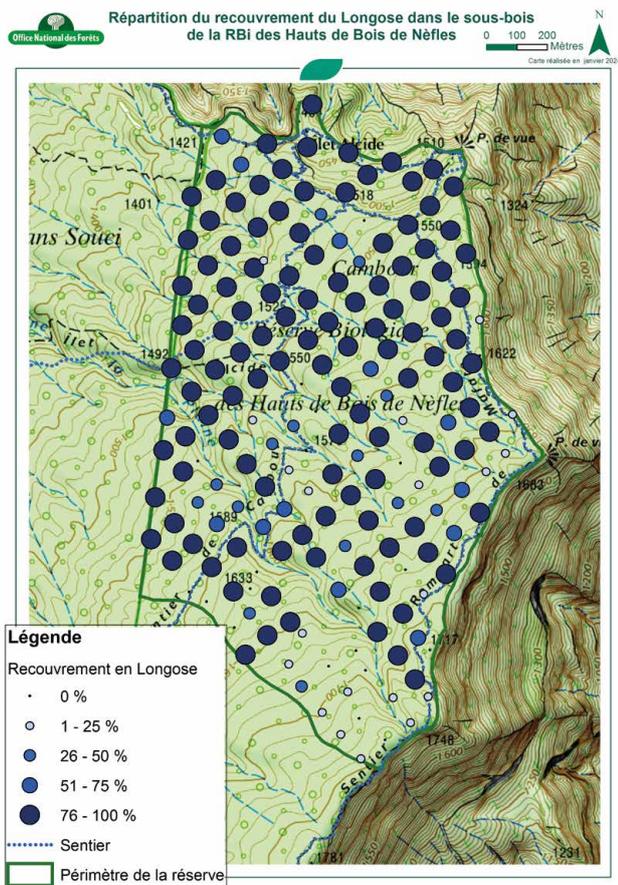
La RBI des Hauts de Bois de Nèfles, située entre 1420 et 1780 m d'altitude et couvrant 179 ha, a été créée en 1985 pour assurer la sauvegarde d'un des derniers vestiges de forêt tropicale de montagne les mieux préservés dans la côte Ouest de La Réunion. Bien que la RBI ait été préservée des défrichements historiques, elle est le siège de phénomènes d'invasions végétales, en particulier par le Longose (*Hedychium gardnerianum*) dans le sous-bois et par le Raisin marron (*Rubus alceifolius*) dans les zones de trouées

et les ravines. L'ONF a donc déployé sa stratégie de lutte contre les espèces exotiques envahissantes dans la RBI. Il s'agit tout d'abord de bien caractériser l'état d'invasion, de prioriser les zones d'interventions, puis d'intervenir, avant d'évaluer l'efficacité des actions et de partager les résultats obtenus avec ses partenaires.

Connaître

L'état d'invasion de la réserve biologique a été inventorié en 2023 sur 190 placettes circulaires de 3 m de rayon, distribuées selon un échantillonnage systématique sur la base d'une placette par hectare. Dans chaque placette, pour le sous-bois et la strate arborée, les recouvrements totaux (i) de la végétation (ii) des espèces indigènes (iii) des espèces exotiques envahissantes, et le recouvrement de chaque espèce exotique envahissante prise individuellement ont été estimés.

Sur l'ensemble des placettes, onze espèces exotiques végétales ont été inventoriées. Très peu d'espèces exotiques sont présentes dans la strate arborée, mais il en est tout autre dans le sous-bois qui est particulièrement envahi, avec un recouvrement moyen de 85,9 % par des espèces exotiques, dont 79,4 % pour le seul Longose (figure 1).

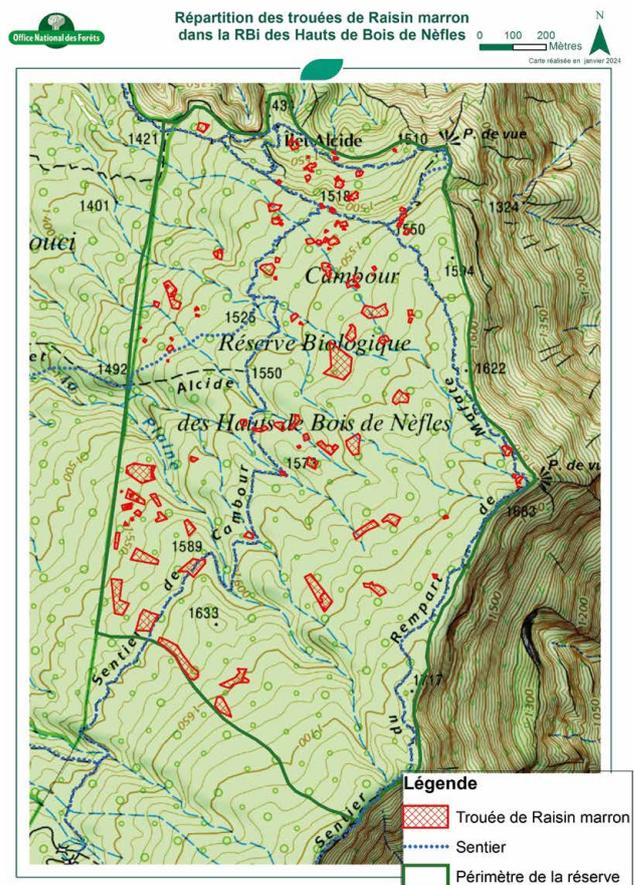


↑ Figure 1. Répartition du recouvrement du Longose

La deuxième espèce la plus préoccupante dans la RBI est le Raisin marron, qui forme par endroits de vastes surfaces de fourrés, et qui a fait l'objet d'une cartographie spécifique. Au total, 147 trouées envahies par le Raisin marron ont été cartographiées, sur une surface totale de 6,9 ha, ce qui représente environ 4 % de la superficie de la RBI (figure 2).

La caractérisation de l'état d'invasion de la réserve biologique a donc révélé une situation préoccupante. Le Longose occupe très densément le sous-bois et limite considérablement la possibilité de régénération naturelle des espèces indigènes ligneuses. Lors de la chute des grands arbres, la capacité des espèces indigènes à cicatiser la trouée est fortement diminuée. De plus, plusieurs espèces exotiques héliophiles parviennent à coloniser ces trouées beaucoup plus rapidement que les espèces indigènes. C'est le cas en particulier du Raisin marron, qui forme un fourré pérenne et dense. Cette liane colonise les arbres périphériques et, par son poids, les fragilise et entraîne souvent leur chute lors des cyclones, ce qui a pour effet d'agrandir la trouée et de favoriser encore le Raisin marron.

D'après l'étude réalisée, la libre évolution n'apparaissait plus comme le mode de gestion adéquat pour assurer la conservation des forêts indigènes présentes dans la RBI. Il semblait important d'agir contre les invasions végétales avant que la situation ne se dégrade encore.



↑ Figure 2. Répartition des trouées de Raisin marron

Prioriser les actions et les zones d'intervention

L'état d'invasion de la RBI était tel qu'il n'était raisonnablement pas possible d'éradiquer les espèces exotiques envahissantes sur l'ensemble de la surface. Comme souvent dans la lutte contre les espèces exotiques envahissantes à La Réunion, les actions et les zones d'interventions ont donc dû être prioritaires.

Arracher le Longose sur de grandes surfaces aurait nécessité d'énormes moyens humains et financiers, pour un résultat limité dans le temps. De plus, la lutte contre le Longose n'est pas prioritaire à l'échelle de l'île, car son état d'invasion est trop avancé. Dans la RBI, il paraissait plus pertinent d'envisager une cicatisation des trouées déjà envahies par le Raisin marron pour assurer le renouvellement progressif de la forêt indigène dans ces trouées. Ces travaux de cicatisation ont consisté en une élimination initiale du Raisin marron par coupe et arrachage, suivie d'actions de contrôle des plantes invasives jusqu'à ce que les espèces indigènes soient assurées de refermer la trouée à terme.

Pour lutter sur la plus grande surface possible, les efforts ont été concentrés sur les zones les plus accessibles, situées hors ravine et à moins de 30 minutes de marche de la piste forestière.



↑ **Figure 3.** Exemple de la trouée n° 2. À gauche : état initial en novembre 2021. En haut à droite : juste après l'élimination du Raisin marron en octobre 2023. En bas : après le passage en contrôle en mai 2024.

Intervenir

Ainsi, 5 trouées envahies par le Raisin marron ont bénéficié d'une action de lutte en plein fin 2023 : coupe, arrachage et mise en andain de Raisin marron. Deux passages en contrôle ont été réalisés en avril-mai 2024 puis en septembre-octobre 2024 afin d'éliminer les plantes exotiques réapparues dans les trouées tout en conservant soigneusement les espèces indigènes ayant régénéré naturellement. Le deuxième passage de contrôle a également permis de traiter une sixième trouée. Les passages de contrôle seront effectués deux fois par an les premières années, jusqu'à ce que les espèces indigènes arborées soient suffisamment développées pour que la cicatrisation des trouées soit qualifiée d'acquise (au moins 3 m de hauteur).

Évaluer l'efficacité des actions

Un premier suivi de l'efficacité des résultats a été réalisé en avril-mai 2024 pour évaluer si les opérations étaient en bonne voie et s'il était nécessaire de prévoir des mesures correctrices ou d'avoir des points de vigilance particuliers. Ce suivi a été mis en place selon le nouveau protocole « SEAL + Régénération » élaboré par le Parc National de La Réunion¹ qui propose d'adopter une méthodologie commune d'inventaire et de suivi de la recolonisation des espèces indigènes et exotiques dans les zones faisant l'objet de restauration écologique.

Quatre à 5 placettes permanentes ont été réparties dans les 5 premières trouées où une action de lutte a été menée. Les recouvrements des espèces indigènes et exotiques, individuels et par statut, ont été estimés sur une surface de 1 m de rayon à partir du centre pour la strate herbacée, et de 3 m de rayon pour les strates arbustives et arborées. Les plantules inférieures à 25 cm et comprises entre 25 cm et 1 m ont été comptées pour les espèces ligneuses dans un rayon de 1 m autour du centre de la placette.

Le suivi a montré une régénération en espèces indigènes très différente selon les trouées (de 18 à 103 plantules/m²), mais globalement suffisante. Le Raisin marron est relativement bien maîtrisé et n'est plus particulièrement problématique. En revanche, d'autres espèces exotiques envahissantes comme le Longose et le Bringellier marron se sont développées à la place du Raisin marron, c'est ce qu'on appelle l'invasion en cascade. La forte présence de Bringellier marron s'explique par la capacité de cette espèce à constituer des banques de graines qui peuvent germer dès qu'elles ont accès à la lumière à la suite de la lutte contre le Raisin marron.

Le premier suivi réalisé a donc montré que le contrôle du Raisin marron était en bonne voie, mais qu'il convenait d'ajouter un contrôle des autres espèces exotiques pour éviter l'étouffement de la régénération naturelle des espèces indigènes. Les passages en contrôle des ouvriers se

sont donc ensuite axés sur le contrôle de l'ensemble des exotiques tout en évitant de piétiner la régénération des espèces indigènes.

Le deuxième suivi, réalisé en novembre 2024, après le deuxième passage en contrôle, a montré l'efficacité du travail réalisé par les ouvriers pour favoriser la recolonisation des espèces indigènes. En strate herbacée, qui représente la strate d'avenir, la diversité et le recouvrement des espèces exotiques diminue tandis que la diversité et le recouvrement des espèces indigènes augmentent.

Partager les résultats obtenus

Les résultats obtenus lors de ce premier suivi ont été partagés avec les principaux partenaires de l'ONF (Département, Parc national, Conservatoire Botanique National de Mascarin, CIRAD, DEAL...) afin d'affiner de manière itérative et collaborative la stratégie de lutte au sein de ce périmètre.

Conclusion

Lutter contre les espèces exotiques envahissantes de la RBI des Hauts de Bois de Nèfles demande un effort important et sur le long terme des équipes de l'ONF, que ce soit pour diagnostiquer les problèmes, réaliser les travaux ou en assurer le suivi. Dans ce contexte, la priorité à court terme est de maintenir la même intensité de lutte afin d'assurer la reprise des espèces indigènes, et éventuellement agrandir progressivement les trouées faisant l'objet de la lutte. Etant donné le nombre de trouées encore envahies par le Raisin marron, il est probable que de nouveaux travaux soient engagés à plus long terme pour sauvegarder cette forêt qui constitue l'un des derniers vestiges de forêt tropicale de montagne de l'Ouest de La Réunion.

Patience, longueur de temps et persévérance... Les équipes ONF de La Réunion en ont chaque jour besoin pour lutter contre les espèces exotiques envahissantes aujourd'hui considérées comme la menace la plus importante pour la survie des écosystèmes naturels insulaires.

Remerciements

Les auteurs remercient le département de La Réunion, l'Europe et le Ministère en charge de l'écologie (Mission d'intérêt général Biodiversité et Paysage) pour le financement des actions de lutte contre les espèces exotiques envahissantes.

Julien Triolo

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Camille Vincendeau

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Charline Henry

ONF – Département Recherche, Développement et Innovation

Léa Marie

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Elia Barnier

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Coline Dehlinger

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Marine Fabiani

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

Mathias Yeve

ONF - Direction régionale de La Réunion, Service forêt et milieu naturel

BIBLIOGRAPHIE

- 1 : Parc National de La Réunion (2022). PROJET FEDER « ECODOM-3E » Synergie RE 0028168 Etat des connaissances sur les données existantes et sur les méthodes de lutte contre les espèces exotiques envahissantes– rapport provisoire. Livrable A6 : Protocole de suivi d'opérations de restauration écologique. 57p.





La revue RenDez-Vous techniques est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à tous les lecteurs (étudiants, établissements de recherche et autres instances forestières et environnementales, notamment). Elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires de la gestion (guides sylvicoles, outils de diagnostic, etc.). Son esprit est celui de la gestion durable et « multifonctionnelle » qui, face aux défis des changements globaux, doit aussi s'adapter en contexte d'incertitudes. Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, témoignages, retours d'expériences terrain, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement.

Directeur de publication

François Bonnet

Rédactrice en chef

Charline Henry

Comité éditorial

François Bonnet, Albert Maillet, Xavier Bartet, Éric Dubois, Didier Pischedda, Claudine Richter, Karine Courtès, Marine Jacquet

Conception graphique

Pollen Studio

Réalisation

Pollen Studio

Crédit photographique page de couverture

Alexandre Piboule / ONF

—

Accès en ligne

www.onf.fr

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

Contact

rdvt@onf.fr

Dépôt légal

Mars 2025

