



HAL
open science

Gestion durable des sols forestiers : nouvelles connaissances et boîte à outils

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

► **To cite this version:**

Noémie Pousse, Laurent Augusto, Emila Akroume, Christine Deleuze, Brigitte Pilard-Landeau, et al.. Gestion durable des sols forestiers : nouvelles connaissances et boîte à outils. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2020, 67-68, pp.3-14. hal-04676544

HAL Id: hal-04676544

<https://hal.science/hal-04676544>

Submitted on 23 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

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

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

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

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

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

(1) ONF, pôle RDI d'Avignon

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

(3) ONF, pôle RDI de Dole

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

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

(6) ONF, dept. Commercial Bois

(7) ONF, dept Recherche, Développement & Innovation

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

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

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

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

Les nouvelles connaissances pour la préservation des sols forestiers

Connaissances pour la gestion raisonnée des exports d'éléments nutritifs

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

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

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

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

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

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

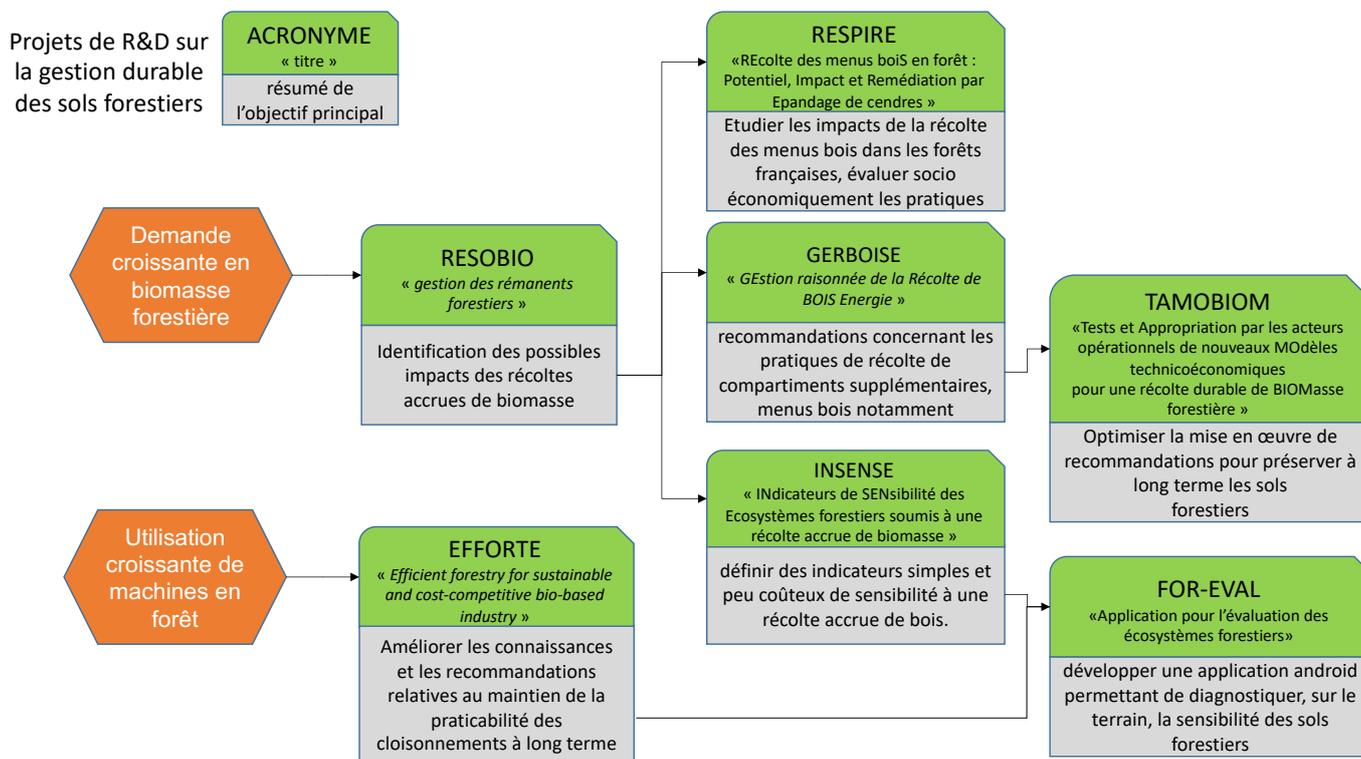


Figure 1. Les différents projets de R&D récents (>2012) en lien avec la gestion durable des sols forestiers.

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

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

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

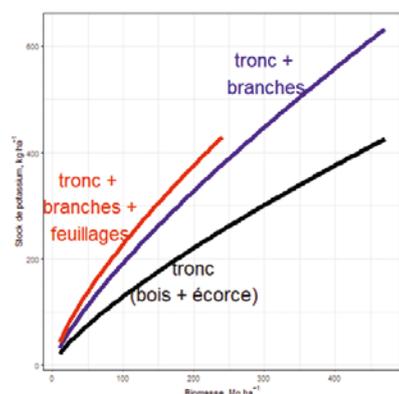


Figure 2. Stock d'élément nutritif contenu dans les arbres, estimé en fonction de la biomasse sur pied du peuplement pour les compartiments considérés : cas du potassium pour les chênes.

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

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

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

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

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

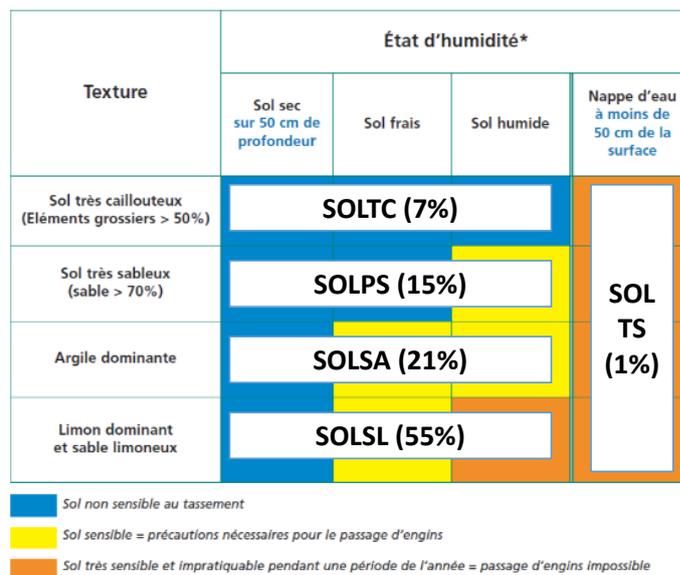
De 2016 à 2019, l'ONF s'est engagé dans le projet collaboratif européen EFFORTE (Uusitalo, 2019), coordonné en France par FCBA, pour améliorer les connaissances et les recommandations relatives au maintien de la praticabilité des cloisonnements à long terme (Fig. 1). Les travaux des partenaires scandinaves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

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

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

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

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



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

Figure 3. Diagnostic de sensibilité des sols au tassement proposé dans le guide PROSOL avec, en superposition, le diagnostic de sensibilité potentielle retenu par l'ONF (code) et le pourcentage de points de l'inventaire forestier national dans la catégorie concernée. Le tableau donne l'explicitation des codes, utilisés dans les référentiels de gestion, et prescriptions correspondantes.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Boîte à outils de diagnostic des sols

Indicateurs de sensibilité à l'export d'éléments nutritifs

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

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

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

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

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

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

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

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

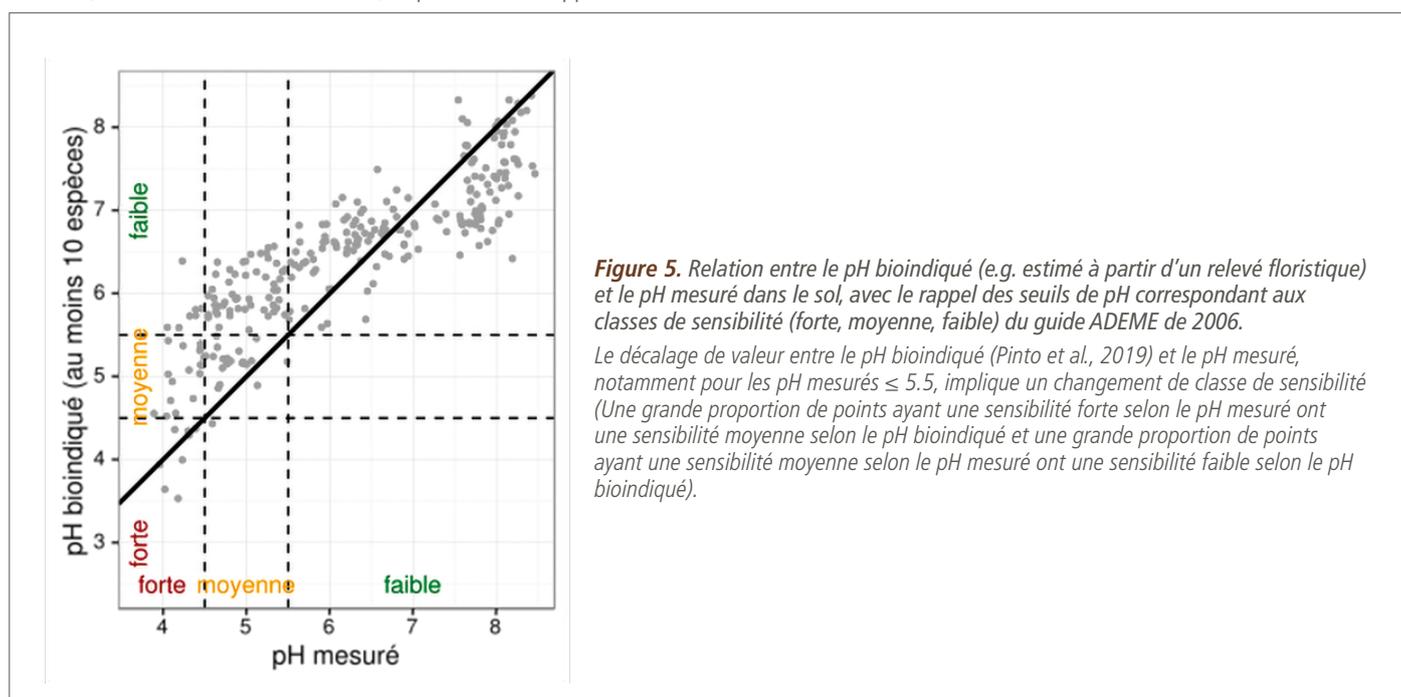


Figure 5. Relation entre le pH bioindiqué (e.g. estimé à partir d'un relevé floristique) et le pH mesuré dans le sol, avec le rappel des seuils de pH correspondant aux classes de sensibilité (forte, moyenne, faible) du guide ADEME de 2006.

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

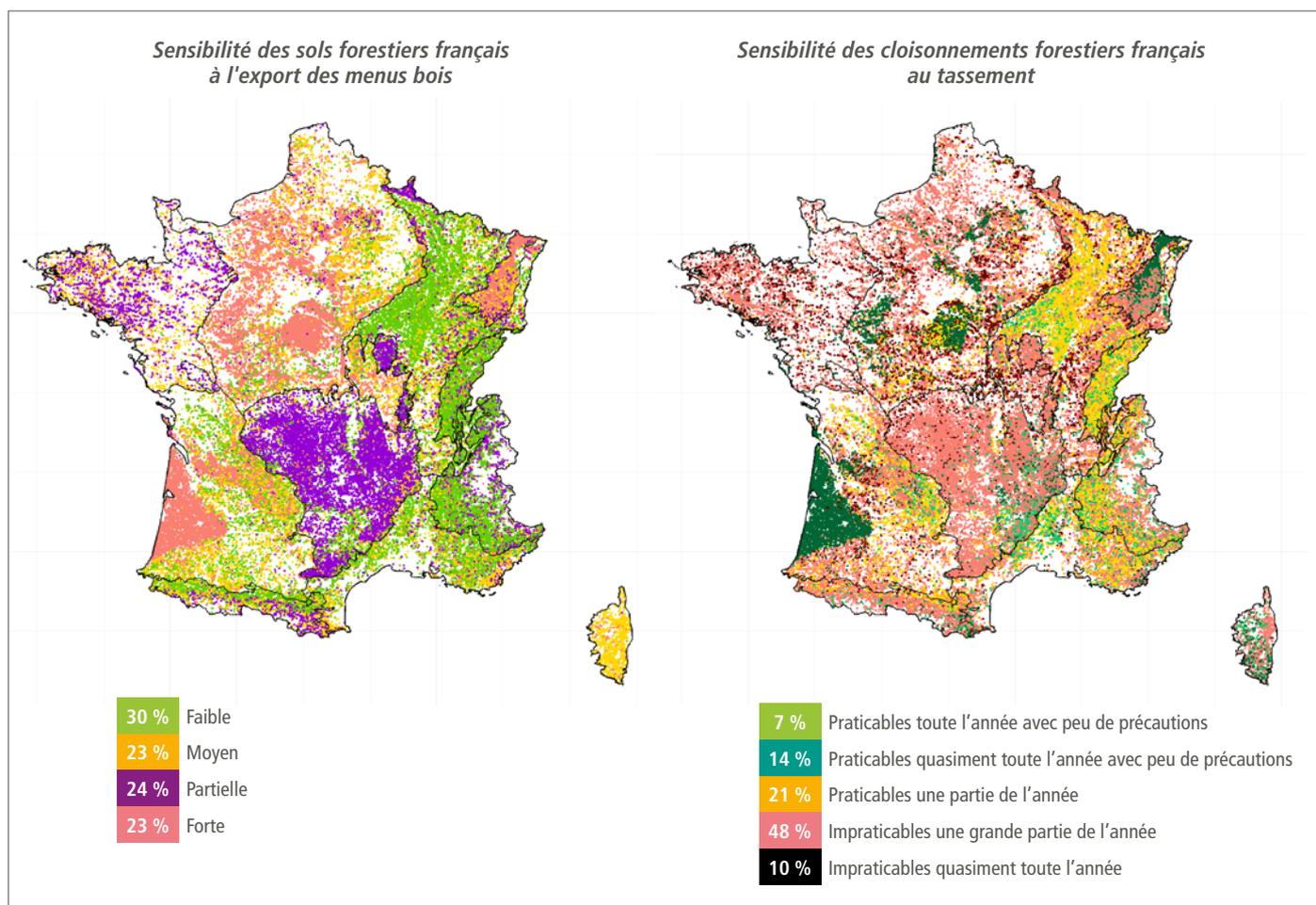


Figure 6. Cartes de sensibilité à l'export de menus bois (gauche) et de sensibilité potentielle au tassement (droite) selon l'outil de diagnostic INSENSÉ et le guide PROSOL, respectivement.

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

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

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

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

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

Le transfert des connaissances

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

Formations aux boîtes à outils

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

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

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

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

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

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

Les diagnostics disponibles concernent les **quatre sensibilités** suivantes :
1) à un export des menus bois (projet INSENSÉ),
2) au tassement (guide PROSOL),
3) à l'érosion hydrique, et
4) à la sécheresse (calcul du Réservoir en eau Utilisable, RU).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Conclusion

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

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

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

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

Références

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

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

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

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

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

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

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



© Noémie Pousse / ONF