

JUIL.  
2018

# RESPIRE - RECOLTE DES MENUS BOIS EN FORET

POTENTIEL, IMPACT, INDICATEURS  
ET REMEDIATION PAR EPANDAGE  
DE CENDRES



SYNTHESE

ADEME



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



## REMERCIEMENTS

Par ordre alphabétique de tous les participants au projet RESPIRE

Jens Abildtrup (INRA), **Emila Akroume (INRA puis ONF RDI)**, Michaël Aubert (Univ. Rouen), Cyrille Bach (INRA), Thierry Berthe (Univ. Rouen), Nicolas Bilot (INRA puis GCF), Alain Bouvet (FCBA), Marc Buée (INRA), Matthieu Chauvat (Univ. Rouen), Christine Deleuze (ONF RDI), Philippe Dreyfus (ONF RDI), Guillaume Echevarria (Univ. Lorraine), **François Elie (Univ. Rouen)**, Laure Fauchery (INRA), Pilar Fuente (ONF RDI), Dominique Gérard (INRA), Damien Lauvin (ONF RDI), Jean-Michel Leban (INRA), Marine Leblanc (UCFF puis GCF), Valentin Leduc (Univ. Rouen), **François Maillard (INRA)**, Matthieu Normand (Univ. Rouen), Edouard Quibel (Univ. Rouen), Hanitra Rakotoarison (ONF RDI), Clark Raveloson (ONF RDI), Jean-Pierre Renaud (ONF RDI), Claudine Richter (ONF RDI), SanJoy Roy (INRA), Laurent Saint-André (INRA), Anne Stenger (INRA), Pauline Viaud (INRA), Lucie Vincenot (Univ. Rouen), et sans qui le réseau MOS n'aurait jamais existé :  
Bernhard Zeller (INRA) !

**En gras les doctorant(e)s financés par d'autres bailleurs (Région, ANR, Ministère) mais travaillant à 100% sur le dispositif MOS et expérimentations en serres associées et contribuant fortement au projet RESPIRE.**

## CITATION DE CE RAPPORT

Saint-André L., Buée M., Aubert M., Richter C., Deleuze C., Rakotoarison H., Abildtrup J., Akroume, E., Bach C., Berthe T., Bilot N., Bouvet A., Chauvat M., Dreyfus P., Echevarria G., Elie F., Fauchery L., Fuente P., Gérard D., Lauvin D., Leban J.-M., Leblanc M., Leduc V., Maillard F., Normand M., Quibel E., Raveloson C., Renaud J.-P., Roy S.-J., Stenger A., Viaud P., Vincenot L., Zeller B. 2019. **RESPIRE – Récolte des menus bois en forêt - Potentiel, Impact, Indicateurs et remédiations par épandage de cendres de bois.** 111 p.

Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 13-60-C0091

Projet de recherche coordonné par : Laurent SAINT-ANDRE  
Appel à projet de recherche : REACTIF

Coordination technique - ADEME : DEPARTE Alba et RIMBAUD Audrey  
Direction/Service : DPED/SFAB

# 1. Introduction

Les pouvoirs publics s'engagent à réduire la consommation des énergies fossiles et à développer le marché des énergies renouvelables afin de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> et de faire face à la raréfaction des sources d'énergie fossile. La Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2016) prévoit de porter la part des énergies renouvelables à 38% dans la consommation finale de chaleur à horizon 2030 avec une forte contribution de la filière biomasse, dont le bois (75 à 92 Mm<sup>3</sup>/an).

Face à l'augmentation programmée de la demande en bois-énergie, deux réservoirs sont envisageables, la production issue de TCR et TTCR (taillis à courte ou très courte rotation) et la filière forêt-bois classique plus extensive. Dans la dernière, plusieurs modes d'exploitation de biomasse sont potentiellement susceptibles de fournir le bois supplémentaire : (i) récoltes en arbres entiers (premières éclaircies en futaie régulière, ouverture de cloisonnement, coupe de taillis en mélange futaie taillis et taillis simple) et (ii) récoltes de houppiers en coupe de régénération. Un rapide panorama de la ressource forestière montre que 12 essences regroupent 80% du volume sur pied et parmi lesquelles, six d'entre elles, le pin maritime, le pin sylvestre, le hêtre, le douglas et le chêne (sessile et pédonculé), représentent 49% du volume (IGN, 2012). Les impacts d'une telle intensification des prélèvements ont fait l'objet d'une étude bibliographique menée par l'ADEME et le Gip-Ecofor (ResoBio et Achat et al. 2013), en incluant notamment les essences mentionnées. Cette étude montre une modification du fonctionnement des écosystèmes d'autant plus forte sur sols chimiquement pauvres, que le prélèvement est intensif, en particulier lorsque les feuilles et/ou les menus bois (branches et tiges de diamètre inférieur à 7 cm) sont exportés. L'impact de l'intensification des récoltes doit également se raisonner dans le contexte des changements climatiques, dans la mesure où la combinaison des stress peut conduire à la non pérennité des peuplements du fait des interactions entre les cycles biogéochimiques. Des pratiques de remédiation, notamment par épandage des cendres de bois comme amendements minéraux, peuvent alors revêtir une importance cruciale en accompagnement de ces récoltes accrues pour (i) compenser les exports additionnels en nutriments liés à ces exploitations et (ii) aider les peuplements à affronter les aléas climatiques. Ces remédiations seraient alors envisagées dans un cadre de gestion circulaire de ce déchet fatal de combustion, aujourd'hui majoritairement recyclé en agriculture.

Tout l'enjeu des recherches à venir sera de définir les modalités pour atteindre au mieux les objectifs fixés par les politiques publiques, tout en s'appuyant sur les processus naturels, pour préciser (i) dans quels cas le prélèvement en bois peut se faire sans risque sur la fertilité des sols (dans toutes ses composantes, chimique, biologique et physique), (ii) comment remédier aux impacts environnementaux lorsque ceux-ci mettent en péril la durabilité des écosystèmes forestiers, (iii) quelle faisabilité économique pour les solutions de remédiation proposées (organisation des acteurs, identification des impacts et des types de coûts liés à l'utilisation des cendres sur les sols forestiers incluant leur conditionnement préalable avant épandage (ex cendres sous forme de granulés, comparées aux cendres seules ou aux cendres humidifiées mélangées avec de la dolomie) et les coûts de logistique (stockage, traitement, épandage, transport) - circuit long ou locaux - compatibilité avec les filières de recyclage agricole etc.).

## 2. Objectifs

Dans ce cadre, les objectifs du projet RESPIRE ont été :

- ➔ D'étudier l'impact d'un prélèvement accru de biomasse sur la matière organique du sol, la dynamique d'éléments nutritifs dans l'écosystème, la biodiversité du sol et les fonctions de cette diversité en lien avec la minéralisation de la matière organique ;
- ➔ De tester l'hypothèse d'un effet de seuil selon l'intensité de prélèvement, l'essence ou le contexte pédo-climatique pour être en mesure de proposer de potentiels indicateurs biologiques

de risques et des limites à ne pas franchir si elles existent (modalité sol-nu dans le dispositif expérimental pour étendre à son maximum la gamme de réponses, deux essences phare testées : chêne et hêtre, gradient de vulnérabilité aux changements climatiques pour chaque essence);

- D'étudier les mécanismes biophysiques de remédiation par les cendres (impact sur les cycles des éléments majeurs et traces, dont les métaux lourds ; impact sur la faune du sol), et dans quelle mesure ils permettent de restaurer les fonctions altérées par le prélèvement des menus bois ;
- De renseigner les politiques publiques en matière d'intensité de prélèvement, et ensuite de remédiation par les cendres (gisements, forme d'épandage, impact sur l'environnement, faisabilité économique, acceptabilité par les gestionnaires et plus généralement, la société).

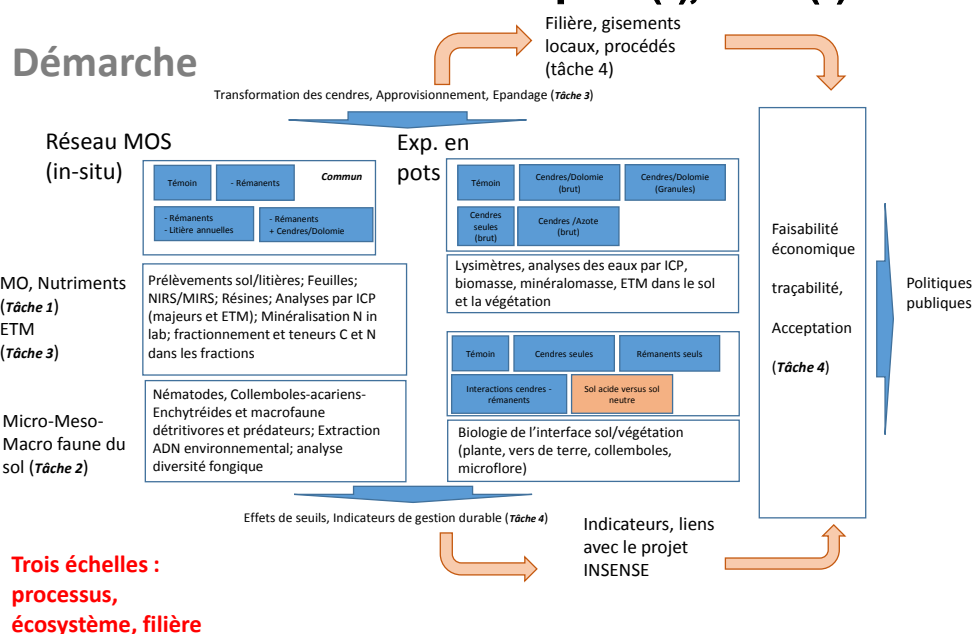
### 3. Structuration du projet

Le projet se structure en 4 tâches complémentaires, dont les 3 premières se focalisent sur les effets d'un retrait des menus bois sur les différents compartiments d'un écosystème forestier et la dernière évalue la faisabilité et l'acceptation par la filière bois d'une remédiation par un apport de cendres.

- La tâche 1 a porté sur les interactions entre les grands cycles biogéochimiques (cycles de l'azote et du carbone) des sols forestiers en se focalisant sur la litière et sur les horizons organiques, compartiments où se localisent une part essentielle de ces cycles biologiques et donc de la durabilité des écosystèmes.
- La tâche 2 du projet s'est intéressé à l'impact des pratiques sylvicoles intensives sur la biodiversité de ces sols forestiers et les fonctions portées par ces organismes : macrofaune, mésofaune, microfaune, assemblages d'espèces fongiques et bactériennes. Cette analyse de la diversité spécifique et fonctionnelle, couplée à celle des cycles géochimiques, permettra d'avoir un panorama global de l'effet de l'intensification des pratiques sur le niveau de la chimie des sols et des acteurs majeurs de la dégradation et de l'assimilation de la matière organique.
- La tâche 3 a porté sur la remédiation par les cendres, avec la dynamique de libération des éléments minéraux dans le sol selon la forme d'épandage (cendre, cendre-dolomie, cendre-résidu luzerne) et de la dose avec l'étude de l'impact, *in situ*, d'un tel épandage sur la biologie du sol et la dynamique des métaux lourds dans l'écosystème.
- La tâche 4 a porté sur une analyse technico-économique des gisements de cendres à l'échelle nationale, une analyse coûts- bénéfices des cendres dans les itinéraires sylvicoles, et enfin une analyse de l'acceptabilité de retour des cendres en forêt auprès de gestionnaires et propriétaires forestiers privés.

# Matériel et méthodes

## Dispositif(s), terrain(s) d'étude



**Figure 1** : La démarche adoptée dans le projet RESPIRE avec les connections entre tâches, liens avec d'autres projets et les sorties. Il s'appuie sur le réseau MOS pour les évaluations des impacts in-situ (de prélèvement accru et de remédiation) et ex-situ (en serre pour mieux préciser certains processus). Les dispositifs en serre ont été installés à l'INRA, centre Grand –Est Nancy pour les thématiques nutriments et Eléments Traces Métalliques (ETM), ainsi qu'à l'université de Rouen pour la thématique méso-macro faune-plantes.

## 4. Méthode et démarche

### 4.1. Des expérimentations in situ et ex situ

Le projet s'est appuyé sur deux types de dispositifs (figure 1). D'une part, sur les expériences en pot pour apporter des précisions sur les processus modifiés par l'apport de cendres en interaction avec les niveaux de biomasse laissés au sol, et d'autre part sur la mise en place et le suivi d'un réseau de 12 sites expérimentaux in-situ (réseau MOS – Matières Organiques des Sols<sup>1</sup>). Ce réseau MOS a été mis en place pour étudier les effets d'un retrait des menus bois sur le fonctionnement des sols et de la végétation (à une échelle décennale). Chaque site couvre une surface de 2 ha, divisé en 12 placettes de 40 \* 40 m, elles-mêmes regroupées en 3 blocs avec 4 traitements par bloc, témoin = **T**, retrait (*menus bois + branches*) = **R**, retrait (*menus bois + branches*) + apport de *cendres-dolomie* = **RC**, retrait (*menus bois + branches + chutes de litière*) = **RL**. Deux essences, chêne et hêtre, ont été choisies et les 6 sites pour chaque essence se trouvent dans des grands massifs de feuillus dans la partie Nord de la France (Akroume et al., 2016). L'originalité de ce réseau repose sur un double gradient sol – climat (gradient de vulnérabilité), l'âge des peuplements (de 15 à 50 ans) quelques années avant la période de l'accroissement maximum et la remédiation par un apport de cendres-dolomie. Avant la mise en place des traitements, des échantillons de sols (humus, 0 - 5 cm, 5 – 10 cm et 10 – 30 cm) ont été collectés en suivant une grille de 20 x 20 m positionnée sur toute la surface d'un site. L'analyse statistique de spectres NIRS et MIRS de ces sols couplés aux données de caractéristiques de peuplements a permis d'obtenir une répartition spatiale de traitements non biaisée (Akroume et al., 2016). La mise en place de traitements a bénéficié du support logistique et analytique de la plateforme mobile d'observation et d'expérimentation des écosystèmes terrestres (M-POETE) de l'infrastructure nationale en Biologie ANAEE-Fr et du laboratoire de biogéochimie de l'infrastructure IN-SYLVA. De plus, sur la plupart des

<sup>1</sup> <https://www6.inra.fr/in-sylva-france/Services/IN-Situ/Reseau-MOS-Manipulation-de-la-matiere-organique-du-sol>

sites, les travaux de collecte de menus bois et de litière ont été menés en partenariat avec le service UEAJ de la PJJ (Protection Judiciaire de la Jeunesse). Avec comme objectif de maintenir l'intégrité des sites sur 30 ans tout en prélevant des échantillons de sol et de litières pour le suivi annuel des propriétés physico-chimiques, un plan de prélèvement a été fixé pour la majorité des opérations in situ.

Les mesures réalisées sur les dispositifs ex-situ et in-situ de RESPIRE sont données dans le tableau A1 (annexe).

Le monitoring de l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol est basé sur un échantillonnage de sols (0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 -30 cm) une fois par an. Par site, 180 échantillons sont collectés, préparés et analysés par spectrométrie infrarouge (NIRS et MIRS). Les spectres obtenus constituent la base pour détecter des variations entre traitements et en fonction du temps. Grâce à cette technique, nous avons la capacité d'analyser tous les sols (180 \* 12 = 2160). En dehors de ce suivi de base, des prélèvements de sol ont été effectués par les partenaires (faune et microbiologie) en utilisant des protocoles d'échantillonnage spécifiques aux communautés d'organismes étudiées, mais en respectant le même découpage vertical. Les deux expérimentations en pots permettent de réaliser une étude plus fine des effets (nutriments, croissance, lessivage, ETM), d'un apport de cendres (formulation, dose) ou des effets biologiques et physico chimiques à un gradient d'exportation de menus-bois et un apport de cendres (type de sol, différents groupes fonctionnels de faune).

## 4.2. Des approches socio-économiques

L'évaluation de la faisabilité socio-économique d'itinéraires techniques plus complets qui assureraient en compensation de récolte de menus-bois un recyclage plus systématique de cendres issues de chaufferies biomasse (avec un approvisionnement en bois majoritaire) repose sur une combinaison de 3 types d'étude :

- **L'estimation du gisement de cendres mobilisable.** La filière de valorisation actuelle en épandage des cendres est agricole, la caractérisation des producteurs et des gisements de cendres de bois disponibles est un préalable important pour raisonner faisabilité et conditions de développement d'une filière adaptée pour la forêt. Les bases de données professionnelles disponibles à l'ONF et GCF sur les chaufferies bois ont été mobilisées.
- **L'évaluation économique pour le propriétaire** d'itinéraires avec récolte de menus bois et compensation des exports accrus en éléments minéraux nutritifs. Pour cela une chaîne de calculs complets a été assemblée pour simuler pour chaque scénario les bilans en biomasse et minéralomasse mobilisés, les besoins en compensation de cendres, et calculer des indicateurs de rentabilité économique compte tenu des coûts des itinéraires et des recettes escomptées.
- **Leur acceptabilité sociale.** Outre l'aspect économique, existe-t-il des blocages plus profonds au choix d'épandre des cendres dans sa forêt, quelles limites d'acceptabilité rencontre-t-on ? Cette étude a reposé sur la réalisation d'un questionnaire développé par les équipes de recherche INRA, du groupe Coopération Forestière avec des représentants de trois coopératives forestières, et de l'ONF. Ce questionnaire a été diffusé à une cible de gestionnaires et propriétaires forestiers privés, en s'appuyant sur les coopératives forestières impliquées dans le projet (COFOROUEST, UNISILVA, CFBL). La transmission a couplé envois postaux et courriers électroniques avec un lien vers une plateforme de sondage en ligne. Outre le recueil d'information générale sur le profil du répondant, son avis et motivation sur l'utilisation des cendres de bois (après une partie introductive exposant le contexte), il a été proposé à chaque répondant de se prêter à une expérimentation de choix multiple. Pour cela, chaque répondant a été confronté à 6 choix de scénarios sur l'utilisation des cendres, en devant pour chacun donner leur option préférée. Les scénarios hypothétiques proposés varient selon quatre attributs différents, expliqués dans le texte et illustrés : le niveau d'impact de l'apport des cendres sur la productivité des peuplements, la méthode d'épandage, l'origine locale ou non des cendres, leurs couts d'application.



## 5. Résultats

### 5.1. Propriétés physico-chimiques du sol, cycles du carbone, de l'azote et lixiviation des ETM

La mise en place des traitements se traduit par une réponse assez lente sur l'évolution des propriétés physico chimiques des sols, dont certains ne sont de toute façon pas ou très peu impactés par le traitement (texture du sol, teneurs totales en éléments minéraux), au moins sur le court terme. L'analyse des spectres NIRS montre que les traitements appliqués ont eu un impact très limité à 12 mois pour les peuplements de chêne qui n'a pas été confirmé à 36 mois. L'exportation totale des menus bois couplée à l'extraction annuelle de la litière (modalité **RL**) n'a visiblement pas encore eu, ou peu, d'effets sur les stocks totaux des éléments minéraux (excepté une légère décroissance significative du rapport C/N et de la teneur en phosphore de l'horizon 0-5 pour les hêtraies). Les résultats sont identiques pour le carbone. En effet, sur l'ensemble des sites prospectés, quel que soit l'horizon ou l'essence, la gestion de la matière organique (retrait des menus-bois et/ou de la litière) avec ou sans apport de cendres n'a aucun impact sur les stocks de carbone et le carbone microbien sur la période de mise en place de l'expérimentation. Il semble donc qu'il faille se donner plus de temps pour pouvoir détecter un effet des différents traitements. D'autre part, des analyses plus approfondies de certains pics des spectres NIRS et MIRS pourraient mettre en évidence des effets plus ciblés sur certains groupes fonctionnels liés au carbone.

De façon similaire aux stocks, la mise en place des traitements n'a pas encore eu d'impact sur la minéralisation et la nitrification de l'azote dans le sol de surface (0 – 5 cm), ni dans le sol plus profond, malgré une forte réduction des intrants dans le traitement **RL** (menus bois enlevés et litière éliminée tous les ans). On peut cependant noter la présence d'une diminution significative ( $- 18,62 \pm 14,29 \%$ ) du taux de minéralisation des sols (0-10cm) sous chêne lors de l'export de la totalité de la matière organiques sus-jacente (modalité **RL**).

La concentration des ETM dans les cendres de bois lors de la combustion est un facteur de risque à prendre en compte. Cependant, sur les expérimentations en pots, avec des doses croissantes d'apport de cendres (jusqu'à un équivalent de 6t MS/ha), le suivi des eaux gravitaires ne montre aucun enrichissement en éléments traces métalliques. Au bout de trois ans, la quantité de métaux lessivés dans les eaux est inférieure pour tous les sols amendés, même à forte dose, par rapport au témoin. De la même façon, aucun transfert n'est visible un niveau des feuilles de hêtres un an après l'application des cendres. Les études qui se sont intéressées aux conséquences des apports d'ETM par les cendres corroborent ces résultats.

Enfin, à titre exploratoire, sur deux sites (Champenoux et Darney, cf Tableau 1), nous avons étudié l'impact du traitement **RL** comparé au témoin **T** sur la croissance des arbres ainsi que sur la densité et les translocations des éléments minéraux dans le bois. Un effet négatif et fortement significatif est constaté pour les cernes proches de l'écorce pour le Hêtre que ce soit pour la largeur de cerne et la densité du bois. Aucun effet n'est observé pour le charme, tandis qu'un très léger effet négatif est constaté pour la largeur de cernes proches de la moelle chez le chêne. Si l'effet sur le hêtre était attendu, celui sur le chêne l'est moins et relève peut-être du faible taux d'échantillonnage (10 carottes par plateau contre 15 chez le hêtre) et le fait que les arbres ont été régénérés naturellement (différence d'âge et de vitesse de croissance au début du peuplement qui n'est plus reflétée par la circonférence des arbres au moment de l'inventaire 30 à 40 ans plus tard). Il est à noter que pour le Hêtre, la diminution de la densité pour les cernes proches de l'écorce induite par la diminution de la largeur de cerne ne représente que 1%, signifiant que non seulement le traitement a diminué la taille des cernes mais aussi probablement la structure des cellules (épaisseur des parois par exemple). Le traitement **RL** a également un fort impact négatif sur les concentrations en minéraux dans le bois, et ce pour les trois essences étudiées et la plupart des éléments étudiés (Ca, Mg, K, P, S) : pour les hêtres, l'effet est observé uniquement pour les cernes proches de l'écorce. Aucune différence significative entre **RL** et **T** n'a été observée pour les cernes proches de la moelle. A contrario, pour les chênes des différences

significatives et négatives sont observées pour les cernes proches de la moelle et ceux proches de l'écorce. Enfin, pour les deux essences (mais plus particulièrement le hêtre), la stœchiométrie entre éléments change au détriment du P et du S dans le traitement **RL**. Ceci est cohérent avec la manipulation des litières et des menus bois qui affecte fortement les éléments minéraux (P et S) où le cycle biologique domine par rapport aux cycles biochimiques et géochimiques.

## 5.2. Faune et microflore du sol

L'exportation accrue de biomasse forestière (litière + menus bois) impacte très rapidement (dès 3 ans) la diversité taxonomique et fonctionnelle des biocénoses des sols pour la majorité des communautés suivies : communautés fongiques, communautés bactériennes, communautés de la macro-méso et microfaune. A partir des ADN environnementaux, la quantification des abondances microbiennes et la structure des communautés fongiques et bactériennes ont été respectivement étudiées en qPCR et par séquençage haut-débit Miseq dans les six dispositifs en hêtraies. Des profils cataboliques microbiens des sols (0-5 cm et 5-10 cm) ont également été réalisés dans ces dispositifs, en ciblant des activités d'hydrolyse ou d'oxydation responsables de la mobilisation de carbone, de phosphore et/ou d'azote. En complément, des facteurs édaphiques de sensibilité et de résilience des sites forestiers à une intensification des pratiques sylvicoles ont été testés. Les communautés de la macro- et de la mésofaune ont été caractérisées respectivement par approche morphologique et séquençage haut-débit Miseq et en plus de la modalité **RL**, la modalité **R** et **RC** ont également été testées sur les deux types de peuplements (Chênes et Hêtres). Un des objectifs majeurs était la recherche d'éventuels indicateurs fonctionnels et/ou taxonomiques biologiques de dysfonctionnements précoces des sols en forêt tempérée.

Concernant la faune du sol, les impacts sont plus nettement visibles pour la modalité **RL** mais également pour l'exportation seule des menus bois (**R**) qui a également un impact négatif mais dans une moindre mesure. Les effets se font moins sentir à l'échelle des grands groupes suivis (e.g. macrofaune, mésofaune) qu'à l'échelle d'unité taxonomique plus précises (e.g. Chilopodes Geophilomorpha ou Scolopendromorpha, Diploures) ou de groupes écologiques (collembolles épédaphiques, collembolles hémiedaphiques), ou encore de groupes trophiques (e.g. acariens prédateurs, macrofaune détritivore...). La réponse des assemblages d'espèces dépend souvent de l'essence dominante dans le peuplement (Hêtre versus Chêne). Par ailleurs, d'une manière générale, la compensation minérale via un apport de cendres ne contrecarre pas les effets négatifs sur la richesse spécifique de l'exportation de menus bois voire appauvrit plus nettement les communautés que le traitement **R** en comparaison au témoin (**T**) sauf pour les Crassiclitellata (vers de terre) sous peuplements de chênes.

Les réponses de la faune du sol aux pratiques expérimentales étant fortement dépendantes des conditions stationnelles (matière organique du sol, essences dominantes, acidité du sol), il est difficile de mettre en avant des taxons bio-indicateurs robustes et génériques. Comme pour la microflore, les résultats montrent que la recherche de bio-indicateurs génériques (portée nationale) ne pourra se faire vraisemblablement qu'à une échelle taxonomique supra-spécifique (e.g. famille, ordre, classe). Par ailleurs, l'utilisation de la méthode IndVal (Dufrene et Legendre, 1997), a mis en lumière la classe des Chilopodes (Ordre des Geophilomorpha, Scolopendromorpha et Lithobiomorpha) en tant que bon candidat pour la bio-indication à l'échelle nationale (Tableau 2). A une échelle régionale (Nord-Est), la même analyse a mise en avant Lithobius borealis et Campodea fragilis comme un bio-indicateur de perturbations de la MO. Pour ce qui est de la mésofaune, l'approche morphologique fastidieuse peut être facilitée en amont par une prédéfinition de potentiels candidats à la bio-indication via l'approche moléculaire fournissant des informations sur la fidélité des taxons aux pratiques. Ainsi, l'utilisation plus routinière du metabarcoding devrait permettre d'appréhender conjointement la mésofaune et la microflore. A partir des résultats acquis lors du projet, les réponses de quelques taxons de la mésofaune (e.g. Oribata, Enchytreida, Isotomiella minor) semblent en faire de bons candidats à la bio-indication sur la base de leur fidélité. Des travaux complémentaires sur leur spécificité aux pratiques permettront de confirmer et d'affiner leurs caractères bio-indicateurs.

*Tableau 2. Résumé des résultats de l'analyse de l'indice IndVal (Dufrene et Legendre, 1997) estimant le potentiel bioindicateur des espèces de la macrofaune aux modalités expérimentales du réseau. Analyse réalisée sur les taxons identifiés par l'approche morphologiques présents dans l'épisolum humifère pour les traitements R (Menus bois exportés), C (Menus bois exportés, compensation par ajout de cendre) et RL (bois et litière exportés)*



annuellement) en fonction des échelles spatiales (nationale ou régionale). n=30 pour l'échelle nationale et n=12 pour l'échelle régionale. Seuls les espèces présentant un IndVal significatif au seuil de  $p < 0,05$  sont présentés.

Echelle spatiale	modalité	Relation	Espèces	Famille	Ordre	Groupe trophique	Indval	p-value
Nationale	R	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
	RC	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
	RL	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Nord -Est	R	-	Lithobius borealis	Lithobiidae	Lithobiomorpha	Prédateurs	50	0,028
		-	Campodea fragilis	Campodidae	Diplura	Détritivores	55,55	0,029
	RC	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
	RL	-	Geophilus insculptus	Geophiliidae	Geophilomorpha	Prédateurs	64,81	0,025
		-	Campodea fragilis	Campodidae	Diplura	Détritivores	55,55	0,03
		-	Lithobius borealis	Lithobiidae	Lithobiomorpha	Prédateurs	55,55	0,027

Les modalités de réponses des différentes communautés d'organismes sont très contextuelles, dépendant de la teneur en matière organique des sols pour la microflore (les sols pauvres en matière organique sont plus sensibles à l'exportation), ou de l'essence dominant les peuplements pour la faune (Hêtre versus Chêne). Il est à souligner que cet effet essence est également très structurant pour les communautés microbiennes, comme cela a pu être illustré à partir des études réalisées sur ces peuplements avant exportation de la matière organique (Akroume, 2015). Plus spécifiquement, pour la microflore, les six hêtraies du réseau ont été sélectionnées : Ban d'Harol, Darney, Verrière-du-Grosbois, Gaillefontaine, Compiègne et Saint-Quirin. L'ensemble des analyses réalisées dans le cadre de cette tâche concerne la comparaison du traitement **RL** et **T**.

Trois ans après la première application des traitements, les communautés bactériennes et fongiques diffèrent fortement en termes de composition entre les placettes **T** et les placettes **RL**. Pour les champignons, dans les deux horizons étudiés, nous avons mesuré une nette diminution du genre saprophyte *Mortierella* dans les traitements où la matière organique avait été exportée. Plus largement, les champignons ectomycorhiziens, établissant une symbiose avec les racines des hêtres, et les levures augmentent significativement dans les placettes **RL** en défaveur des espèces filamenteuses saprophytiques. L'étude des organismes procaryotes montre une expansion significative des bactéries oligotrophes au dépend des taxa copiotrophes, qui eux déclinent dans le traitement **RL**. Étonnamment, les Actinobacteria, qui jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques et en particulier de la cellulose et de la chitine, sont significativement plus abondants dans les parcelles **RL**. (Figure 2).

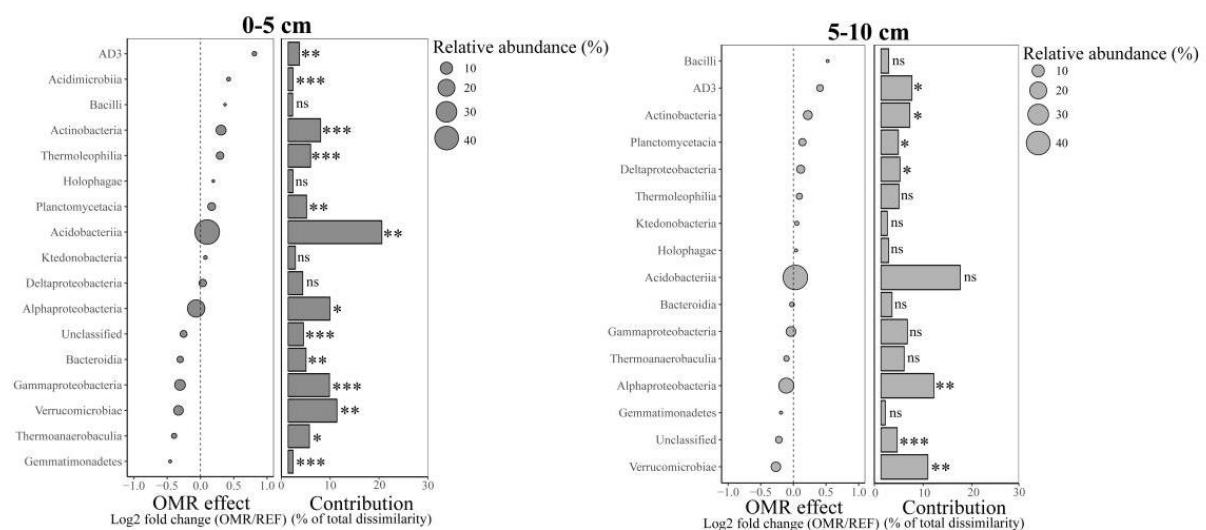


Figure 2. Analyse différentielle (Log2 fold change) de la composition de la communauté bactériennes en réponse au traitement **RL** (0-5 et 5-10 cm). Effets significatifs (3 niveaux) de l'élimination de la MO en fonction de la profondeur du sol (modèle linéaire mixte avec le site comme facteur aléatoire): \* $P \leq 0.05$ ; \*\* $P \leq 0.01$ ; \*\*\* $P \leq 0.001$ . OMR effect: effet de l'exportation de matière organique (rapport **RL/T**).

A l'inverse, la proportion de certaines classes bactériennes, comme les Verrucomicrobiae ou les Gammaproteobacteria, est significativement diminuée dans les placettes soumises au retrait de la matière organique. Chez le hêtre, la chute des Verrucomicrobia est concomitante avec une diminution significative de l'ordre de 31 % des nématodes pour le traitement **RL** par rapport au témoin. Il est intéressant de souligner que ces bactéries incluent de nombreuses espèces non cultivables et plus particulièrement des espèces ayant été identifiées en association avec des hôtes eucaryotes, notamment comme endosymbiontes de nématodes résidant dans les gamètes de ces derniers (Coomans et al. 2000). En perspective du présent travail, il serait donc nécessaire de réaliser, sur un large nombre d'échantillons, des analyses de réseaux entre les différentes communautés d'organismes (e.g. évolution des réseaux de co-occurrence) pour mettre en lumière les nœuds centraux de ces réseaux (potentielles « espèces clé de voûte ») et les potentielles interactions trophiques et fonctionnelles atteintes par l'exportation de la MO forestière. Enfin, l'analyse des indicateurs fonctionnels enzymatiques met en lumière l'importance d'extraire de potentiels marqueurs moléculaires fonctionnels largement distribués et indépendant de la diversité spatiale (e.g. locale et régionale) microbienne, à partir d'études méta-transcriptomiques par exemple, puis de valider la généralité de leur évolution en réponse à l'exportation de biomasse.

Ainsi, en perspective, une étude de métatranscriptomique pilote, indépendante du projet RESPIRE, nous a permis de mettre en évidence sur le dispositif de Ban d'Harol une surexpression, dans le traitement **RL**, d'un large spectre de fonctions bactériennes associées à la dégradation des parois microbiennes, et plus particulièrement fongiques, suggérant que la diminution des ressources organiques d'origine végétale conduirait une partie du cortège bactérien à dégrader les parois cellulaires microbiennes, en l'occurrence fongiques, composant en partie la matière organique de ces sols.

### 5.3. Evaluation socio-économique d'itinéraires de prélèvements de menus bois avec compensation cendres

#### Estimation des gisements de cendres

Le gisement de cendres peut être évalué en 2016/ 2018 dans une fourchette de 107 kT/an (BDD ONF) à 180 kT/an (estimation CIBE). L'estimation de 110 kT/an avec la BDD ONF tient compte du type d'approvisionnement biomasse des installations (majoritairement biomasse bois propre). D'après le CIBE (2017), 65 % de ces cendres seraient valorisées par des épandages en agriculture. La région offrant la plus forte production des cendres est le Grand Est (plus de 20 kT/an) suivi par la Nouvelle Aquitaine (17 kT), Auvergne Rhône Alpes (plus de 10 kT) et le couple Normandie/Hauts de France (20 kT). La superposition des cartes de sensibilité des sols (sols pauvres) à l'exportation de biomasse (INSENSE) avec les cartes ressources indique des zones à risque. Cette étude souligne l'intérêt pour des circuits courts de retour de cendres en Grand Est (Ardennes / Vosges), Normandie/Hauts de France, et Nouvelle Aquitaine.

#### Évaluation d'itinéraires technico-économiques

Pour simuler les productions en biomasse et minéralomasse et répartitions entre menus bois et bois-fort sur des itinéraires complets de peuplement une méthode et des chaînes de calcul ont été mises en place. Un autre calculateur, nettement plus simple (feuille excel), a été constitué pour évaluer les coûts d'apport de cendres, qui se situe entre 350 et jusqu'à 1400 €/ha en fonction des quantités apportées et des hypothèses de filière (filière courte ou longue modulant les coûts de transport ; contribution ou non des chaufferies avec une hypothèse favorable dans les simulations d'une prise en charge de 75€/tonne valorisée). Sous les hypothèses technico-économiques actuelles, avec un prix du bois énergie sur pied comprenant des menus-bois d'environ 10 €/m<sup>3</sup> (valeur indicative moyenne actuelle), les simulations sans compensation de cendres montrent des gains économiques à long terme liés à la récolte partielle de menus bois (1<sup>ère</sup> éclaircie et coupe finale) ou totale (toutes les coupes) marginaux (cas du hêtre) et

non significatifs (cas du chêne), avec un risque d'effets négatifs sur la productivité des peuplements sur sols sensibles. Les résultats de l'analyse de sensibilité autour de la perte de productivité montrent une diminution forte de rentabilité des itinéraires avec récolte de menu-bois par rapport à l'itinéraire de référence (pas de récolte de menus-bois) dès que les pertes de fertilité dépassent 1 %.

Les apports de cendres dans les simulations ont été calculés de manière à compenser les exports supplémentaires des éléments minéraux K, Ca, Mg et dans une moindre mesure P, contenus dans les menus-bois, avec l'hypothèse que de tels apports pourraient limiter les effets négatifs sur la productivité des peuplements. Avec compensation, les résultats économiques obtenus sont au mieux équivalents à l'itinéraire de référence, dans les cas où les apports de cendres sont réalisés en fin de révolution et pour les coûts de cendres les plus bas (incluant un financement des chaufferies et une maîtrise globale des coûts de transformation et de transport des cendres).

Ces simulations réalisées en peuplements réguliers feuillus de hêtre ou de chêne, et dans les conditions actuelles du marché (prix du bois, coût des travaux...), indiquent qu'il y a peu d'intérêt économique à long terme pour les propriétaires pour des itinéraires avec récolte de menu bois, même partielle. Si toutefois, les menus bois sont récoltés dans le but de répondre aux enjeux énergétiques actuels, alors une organisation de la filière autour d'une compensation éventuelle par des cendres, qui maintiendrait la productivité des peuplements devra être développée.

Pour les propriétaires, l'intérêt des récoltes de bois énergie avec menus-bois reste en premier lieu d'ordre sylvicole pour permettre la réalisation des premières éclaircies en opération blanche ou légèrement positive (les coûts des exploitations mécanisées en arbres entiers étant moins élevés comparés à ceux des systèmes avec découpe et abandon des menus-bois) ou nettoyer les parterres de coupes des gros houppiers feuillus pour les régénérations. Cet intérêt est renforcé par la diminution constatée de l'affouage et des cessions.

## **Étude de l'acceptabilité sociale**

Dans une enquête réalisée auprès des membres de trois coopératives forestières en France, 87 % des 211 gestionnaires et propriétaires forestiers interrogés se sont déclarés prêts à épandre les cendres, si à l'avenir les conditions techniques, économiques et réglementaires le permettent. Le résultat d'une expérience par choix, où il a été demandé aux répondants de choisir entre des scénarios futurs caractérisés par (i) un effet différent des cendres sur la productivité forestière, (ii) la technologie d'épandage, (iii) les hypothèses de filière cendres et (iv) les coûts, montre que, en moyenne, les répondants ont un consentement à payer (CAP) pour les cendres lorsque le recyclage de celles-ci évite une perte de fertilité, de 187 €/ha/révolution.

L'expérience par choix montre également que le CAP augmente avec un impact positif espéré sur la productivité et avec l'hypothèse d'une filière en circuit court des cendres. Si la production de bois augmente de 1% au cours d'une révolution, la volonté de payer augmente d'environ 10 €/ha/révolution. Si le circuit des cendres est court, le CAP augmente d'environ 49 €/ha/révolution.

Les simulations pour les itinéraires technico-économiques ont montré des coûts d'apports de cendres très variables selon le besoin de compensation (pour maintenir la productivité) et les hypothèses de filière cendres retenues (circuit court ou long, financement ou non des chaufferies), et qui sont compris dans une fourchette de 350 €/ha jusqu'à 1400 €/ha. Les 2 approches réalisées sont donc contrastées mais indiquent la tendance suivante : sous la réserve des hypothèses technico-économiques retenues, les coûts des apports des cendres issues des simulations sont supérieurs aux consentements à payer issus de l'expérience par choix.

Dans les conditions actuelles du marché (prix du bois, coût des travaux...), les simulations réalisées sur les 12 peuplements du réseau MOS montrent que les propriétaires n'ont pas d'intérêt économique à long terme évident aux récoltes de menus bois en tant que telles (l'intérêt est en premier lieu d'ordre sylvicole). Il en est de même pour des itinéraires avec récolte de menus bois, même partielle incluant une compensation éventuelle par des cendres, qui maintiendrait la productivité des peuplements.

## 6. Synthèse et retour sur les objectifs

- **Impact** : dans le délai du suivi expérimental (36 mois), les impacts de l'exportation des menus bois apparaissent progressivement et principalement sur l'activité biologique du sol. Ces résultats touchent tout ou partie du réseau MOS (certains résultats sont acquis à titre exploratoire sur quelques sites) avec :
- In-situ, nous n'observons pas ou peu d'effets des traitements sur les propriétés du sol, même à 36 mois pour tous les traitements (excepté sur le C/N, la teneur en phosphore et la minéralisation potentielle du carbone qui sont en diminution sur le traitement sol nu);
  - un impact significatif et négatif sur la croissance et la densité du bois pour le hêtre sur le site de Darney pour le sol nu (à consolider sur les 5 autres sites hêtres du réseau)
  - un impact significatif (diminution) sur les teneurs en minéraux dans le bois et un changement de stœchiométrie (en défaveur du phosphore et du soufre) pour le chêne et le hêtre sur les deux sites étudiés (respectivement Champenoux et Darney - à consolider sur les autres sites du réseau MOS) ;
  - pour les dispositifs en hêtraie, une augmentation significative de la surface des racines fines de l'horizon 0-5 (sauf pour deux sites : Saint-Quirin et Darney) et de l'horizon 5-10 (en augmentation significative pour l'ensemble des 6 sites hêtres) ;
  - un impact significatif du traitement sol nu (versus les autres) sur la diversité du sol dès 24 mois pour tous les sites (faune) et les hêtraies (microorganismes);
  - un impact également du traitement sol nu sur les fonctions microbiennes en hêtraies, avec une réduction particulièrement sensible dans l'horizon 0-5 de la capacité de métabolisation des substrats carbonés et azotés par les bactéries ainsi qu'une diminution de certaines activités de mobilisation d'azote et de phosphore des champignons en réponse au retrait de matière organique.
- **Indicateurs** : les résultats permettent de proposer des indicateurs précoces de la modification du fonctionnement des écosystèmes suite à l'exportation de matière organique (litière et menus bois), basés sur la macrofaune, la mésofaune, les cortèges microbiens (bactéries et champignons), les fonctions microbiennes et les bandes spectrales. Malheureusement, la très grande variabilité des organismes du sol en fonction des conditions pédoclimatiques ne permet pas de proposer des bio-indicateurs spécifiques fiables. Toutefois, à l'échelle de l'ensemble du réseau, pour la macrofaune, la classe des Chilopodes (Ordre des Geophilomorpha, Scolopendromorpha et Lithobiomorpha) a été identifiée comme potentielle source de bio-indicateurs. A une échelle plus restreinte (Nord-Est), les espèces *Lithobius borealis* et *Campodea fragilis* ont été identifiées comme des bio-indicateurs précoces des effets de l'exportation de la matière organique. En ce qui concerne la mésofaune, l'approche par metabarcoding a montré que des espèces à réponse rapide et fiable aux pratiques de gestion étaient à rechercher au sein des groupes suivants : Acariens Oribates, Enchytréides et collemboles (e.g. l'espèce *Isotomiella minor*). Pour les champignons, une nette diminution du genre *Mortierella* dans les hêtraies en réponse à l'exportation de MO nécessite d'être validée dans d'autres peuplements, en particulier dans les chênaies. Cette validation est également nécessaire pour les organismes procaryotes qui montrent des changements de proportions relatives entre groupes oligotrophes et copiotrophes. Étonnamment, les Actinobacteria, qui jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques, sont significativement plus abondants dans les parcelles soumises au retrait de MO. Cette observation nécessite également d'être confortée sur d'autres peuplements, mais aussi dans le temps, car une telle augmentation ne pourrait être que transitoire.
- **Remédiation par les cendres** : sur les expériences en serre, le suivi des eaux gravitaires ne montre aucun enrichissement en éléments traces métalliques. Au bout de trois ans, la quantité de métaux lessivés dans les eaux est inférieure pour tous les sols amendés, même à forte dose, par rapport au témoin. Mais d'une manière générale, les résultats montrent que la compensation minérale par apport de cendres ne contrecarre pas les effets négatifs de l'exportation de menus-bois sur la richesse spécifique de la faune voire appauvrit plus nettement les communautés de faune du sol. Elle semble cependant restaurer certains potentiels (ex minéralisation potentielle du C, et lixiviation des métaux lourds diminuée par une légère augmentation du pH des eaux de drainage)

→ **Renseigner les politiques publiques** : les estimations des gisements actuels varient entre 107 et 180 kt selon les bases de données utilisées sur les chaufferies existantes. Les grandes chaufferies (>20MW) représentent 6% des effectifs mais produisent 49% des cendres. La superposition des cartes de sensibilité des sols à l'exportation de menus bois (projet ADEME INSENSE) avec les cartes ressources en cendres indique des zones d'intérêt potentiel pour des circuits courts de retour de cendres, en éventuelle compensation de prélèvements de menus bois ET/OU en restauration de fertilité de sols (sans qu'il y ait eu de prélèvements de menus bois). Les grandes zones se situent en Grand Est (Ardennes / Vosges), Normandie/Hauts de France, et Nouvelle Aquitaine. Les simulations complètes réalisées sur 6 sites de hêtre et 3 sites de chêne indiquent, dans les conditions actuelles de prix du bois-énergie, qu'il y a peu d'intérêt économique pour les propriétaires pour des itinéraires avec récolte de menus bois, même partielle (à la première éclaircie et à la coupe finale), incluant une compensation éventuelle par des cendres qui maintiendrait la productivité des peuplements. L'intérêt des récoltes de bois énergie avec menus bois reste en premier lieu d'ordre sylvicole pour permettre la réalisation des premières éclaircies en opération blanche ou légèrement positive ou de nettoyer les parterres de coupes des gros houppiers feuillus pour les régénérations. Cet intérêt est renforcé par la diminution constatée de l'affouage et des cessions. Ce résultat est en cohérence avec une enquête qui indique que 87 % des 211 propriétaires forestiers interrogés se sont déclarés prêts à épandre les cendres, si à l'avenir les conditions techniques, économiques et réglementaires le permettent.

## 7. Perspectives

Les chaînes d'outils étant en place, il est maintenant possible d'explorer des options de simulations complémentaires, notamment avec des itinéraires permettant de suivre les préconisations du guide GERBOISE pour les sols sensibles (pas de récolte de menus-bois, réalisation de la première éclaircie au stade prévu dans les guides sylvicoles mais dans un cadre de travaux sylvicoles (soit un coût additionnel à prendre en compte dans l'itinéraire), avec abandon des arbres sur coupe). Cet itinéraire serait à comparer aux itinéraires de RESPIRE, avec impact sur la productivité ou apport de cendres en compensation. Cette chaîne de modélisation reste cependant à affiner pour prendre en compte les effets sites sur les estimations des exports en minéralomasse, des hypothèses de perte de fertilité en continu, qui pourrait arriver après la première récolte de menus-bois, d'explorer d'autres intensités de prélèvements des menus bois suite aux résultats du projet GERBOISE. Concernant le fonctionnement des écosystèmes, il s'agira de conforter sur le moyen terme, la robustesse des indicateurs de dysfonctionnement en cas d'exportation accrue de biomasse et des indicateurs de restauration de la résilience via l'apport des cendres. Les résultats principaux ont été obtenus sur le traitement drastique (sol nu), et seul le suivi à moyen et long terme permettra de répondre correctement à l'impact des prélèvements accrus de menus bois sur la production et plus généralement le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

Le projet RESPIRE a pour la première fois permis d'effectuer une synthèse croisée des résultats (techniques, économiques, environnementaux, sociétaux), et même si les résultats obtenus doivent être consolidés, ils constituent une première base pour les gestionnaires forestiers publics et privés. Ils indiquent également qu'un retour des cendres de bois en forêt permettrait d'une part de restaurer certaines fonctions du sol, et d'autre part de stopper les transferts de fertilité actuels (forêts vers terres agricoles), avec un consentement à payer des propriétaires significatif, mais encore insuffisant par rapport au coût estimé de ces épandages, sans mécanisme financier de soutien.

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

Akroume E., Zeller B., Buee M., Santenoise P., Saint-André L.. 2016. *Improving the design of long-term monitoring experiments in forests: a new method for the assessment of local soil variability by combining infrared spectroscopy and dendrometric data*. *Annals of Forest Science*, 73(4) :p. 1005:1013. <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-016-0572-3>

Coomans, A., Claeys, M., & Vandekerckhove, T. T. (2000). *Transovarial transmission of symbionts in Xiphinema brevicollum (Nematoda: Longidoridae)*. *Nematology*, 2 : 443-449.



# ANNEXE

Tableau A1 - Liste des mesures et des suivis réalisés sur l'ensemble du dispositif RESPIRE (expérimentation ex-situ et in-situ)

		Tâche 1			Tâche 3			Tâche 4				
		Pptés du sol	Teneurs/stocks C	Potentiel de minéralisation N	potentiel de minéralisation du C (litière + 0-10cm)	Lixiviation minéraux et ETM, croissance des plants, pH du sol et des eaux de drainage	CEC, cations échangeables, pH des sols, croissance vers de terre, dynamique communautés mesofaune, traits végétatifs et fonctionnels des plantes	Simulation scénarios d'export biomasse et minéralomasse sur révolution complète	calcul compensation cendres	simulation économique		
Essences	Sites	T=0	T12, 24, 36	T12, 24, 36	T=36			Sans objet	Sans objet	Sans objet		
Chêne	Champenoux	x	x	x (T12, T24, T36)	x			x	x	x		
Chêne	Reichshoffen	x	x	x (T24, T36)	x			x	x	x		
Chêne	Compiègne Chêne	x	x	x (T12, T24)	x			x	x			
Hêtre	Compiègne Hêtre	x	x	x (T12, T24)	x			x	x			
Hêtre	Darney	x	x	x (T12, T24, T36)	x			x	x	x		
Hêtre	Verrière-du-Grosbois	x	x	x (T12, T24, T36)	x			x	x	x		
Hêtre	Ban d'Harol	x	x	x (T12, T24, T36)	x			x	x	x		
Hêtre	St Quirin	x	x	x (T24, T36)	x			x	x	x		
Hêtre	Gaillfontaine	x	x	x (T24, T36)	x			x	x	x		
Chêne	Fontainebleau	x	x	x (T36)	x			x	x	x		
Chêne	Tronçais	x	x		x			x	x			
Chêne	Grosbois	x	x		x			x	x			
(Hêtre et Poa nemoralis)	Expérimentation en pots					X	X					
		Tâche 2										
Essences	Sites	Macrofaune (litière + 0-25cm) - approche morphologique	Mésofaune (litière + 0-5cm) approche morphologique	Microfaune (litière + 0-5cm) approche morphologique	Macro-, meso-, microfaune par Metabarcoding	Biomasse bactérienne (0-10cm)	Communautés fongiques initiales (metabarcoding) dans 0-5 et 5-10	Communautés fongiques (metabarcoding) dans 0-5 et 5-10	Communautés bactériennes (metabarcoding) dans 0-5 et 5-10	Mesures des fonctions (indicateurs - CLPP) microbiennes (approche enzymatique + Biolog) à 0-5 et 5-10	Mesures racinaires (surface des racines fines 0-5 et 5-10)	Quantification des réserves N et C dans les racines fines et le tronc
		T=36	T=12 et 30	T=36	T=36	T=36	T=0	T=36	T=36	T=36	T=36	T=36
Chêne	Champenoux	x	x	x	x	x	x					x
Chêne	Reichshoffen	x (+ T12 et T36)	x	x	x	x	x					
Chêne	Compiègne Chêne	x (+ T12 et T36)	x	x	x	x	x					
Hêtre	Compiègne Hêtre	x	x	x	x	x	x					
Hêtre	Darney	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Hêtre	Verrière-du-Grosbois	x (+ T12 et T36)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Hêtre	Ban d'Harol	x (+ T12 et T36)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Hêtre	St Quirin	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Hêtre	Gaillfontaine	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Chêne	Fontainebleau	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Chêne	Tronçais	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Chêne	Grosbois	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
(Hêtre et Poa nemoralis)	Expérimentation en pots	x	x	x	x	x	x					



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



# RESPIRE – RECOLTE DES MENUS BOIS EN FORET

## Potentiel, impact, indicateurs et rémédiation par épandage de cendres

Les impacts de l'exportation des menus bois apparaissent progressivement et principalement sur l'activité biologique du sol. Ces résultats touchent tout ou partie des parcelles étudiées

Des pistes intéressantes peuvent être proposées pour élaborer des indicateurs précoces de la modification du fonctionnement des écosystèmes suite à l'exportation de matière organique

La compensation minérale par apport de cendres ne contrecarre pas les effets négatifs de l'exportation de menus-bois sur la richesse spécifique de la faune. Elle semble cependant restaurer certains potentiels

L'intérêt des récoltes de bois énergie avec menus bois reste en premier lieu d'ordre sylvicole pour permettre la réalisation des premières éclaircies. 87 % des 211 propriétaires forestiers interrogés se sont déclarés prêts à épandre les cendres, si à l'avenir les conditions techniques, économiques et réglementaires le permettent

