



HAL
open science

Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers

Emila Akroume, Bernhard Zeller, Marc Buée, Laurent Saint-André, Arnaud Reichard, Christine Gehin, Cyrille Bach

► To cite this version:

Emila Akroume, Bernhard Zeller, Marc Buée, Laurent Saint-André, Arnaud Reichard, et al.. Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2017, 54, pp.9-21. hal-02622660

HAL Id: hal-02622660

<https://hal.inrae.fr/hal-02622660v1>

Submitted on 26 May 2020

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.

Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers

Face aux enjeux du climat, les politiques publiques cherchent à réduire les émissions de gaz à effet de serre en s'appuyant sur les énergies et matériaux renouvelables, dont le bois. Ce qui ravive les questionnements de gestion forestière durable, en particulier en ce qui concerne l'effet d'exportations accrues sur la vitalité des sols, et par conséquent sur l'ensemble de l'écosystème forestier. Pour explorer la question en contexte tempéré, l'INRA met en place un réseau expérimental doublement original : dans le choix du dispositif expérimental et dans la méthode d'installation, tout à fait inédite.

Les pouvoirs publics français et européens ont fixé un objectif de 23 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale métropolitaine pour 2020 (Grenelle de l'Environnement et Directive européenne 2009/28/CE). Cet objectif est maintenant actualisé à 32 % à l'horizon 2030. Au bilan de l'année 2015, la France en était à 14,9 % d'énergies renouvelables, un peu en retard sur la trajectoire définie par la Directive (MEEM, 2017). Pour atteindre l'objectif, la filière bois-énergie est particulièrement mise à contribution. Pour exemple, les volumes de bois commercialisés en bois-énergie (hors auto-consommation), qui s'élevaient à 405 000 m³ en 2008, ont augmenté de 147 % en Lorraine entre 2008 et 2012 (source : DRAAF, enquête annuelle de branches 2012).

Cet objectif ambitieux amène à envisager des « gisements » supplémentaires selon deux types de stratégies : (i) le développement de cultures dédiées de types TCR et TTCR¹ ; (ii) une mobilisation accrue de biomasse forestière par raccourcissement des rotations, par l'exploitation d'arbres

entiers, houppier inclus, ou par la récolte des rémanents d'exploitation usuellement restitués à l'écosystème. L'éventualité d'une récolte plus intense des menus bois et résidus de coupe, compartiments réservoir de minéralomasse et de diversité biologique, interroge nécessairement sur les impacts que cela pourrait engendrer sur la pérennité de la fertilité, de la productivité et sur la diversité des organismes des sols forestiers. Une question s'impose alors : comment récolter durablement plus de bois-énergie sans remettre en cause la fertilité et la biodiversité des sols forestiers ?

Les problématiques d'intensification des récoltes, en relation avec la mécanisation forestière, ont suscité de par le monde de nombreuses études destinées à évaluer les impacts sur le long terme. Mais ces travaux concernent surtout les zones tropicale, boréale et sub-boréale. Le manque de références en contexte tempéré, notamment en peuplements feuillus de plaine, ne permet pas d'appréhender convenablement les effets d'une exportation accrue de biomasse sur la forêt française. Ce constat soulève la nécessité d'un

dispositif expérimental d'envergure, adapté au contexte biogéographique et sylvicole des forêts françaises mais aussi à la réactivité plus ou moins différée des écosystèmes aux exportations, selon les situations géographiques.

C'est ainsi que l'idée du réseau MOS – Matières Organiques du Sol – s'est imposée, pour se concrétiser en janvier 2013 avec les premières opérations d'installation. Ce dispositif expérimental multisite est piloté par l'unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers (BEF) de l'INRA Nancy-Lorraine en collaboration notamment avec l'ONF. Le but est d'évaluer les impacts à court, moyen et long termes d'un prélèvement intense de biomasse forestière sur l'écosystème forestier ainsi que d'éventuels moyens de remédiation.

Après un bref rappel de l'état des connaissances dans ce domaine, nous allons présenter les principes de la conception du réseau, puis son installation, avec les innovations mises en œuvre pour caractériser l'état initial des sites et faciliter les suivis, et nous évoquerons les projets de recherche dont il est le support.

¹ TCR (TTCR) = Taillis à (Très) Courte Révolution

Impacts des prélèvements accrus de biomasse sur les sols forestiers

Quelques résultats de l'Étranger

Il existe à travers le monde plusieurs réseaux de suivi à long terme des effets d'une intensification des récoltes sur les propriétés biogéochimiques et biologiques des sols forestiers : le réseau CIFOR (*Center for international forestry research*) mis en place en forêt tropicale en 1998 (Nambiar *et al.*, 1999), les dispositifs nord-américain LTSP (*long-term soil productivity*) installés en 1995 en zone boréale à tempérée (Powers *et al.*, 2005) et, depuis une quarantaine d'années, un ensemble de sites expérimentaux dans la zone boréale de Fennoscandie (Helmisaari *et al.*, 2011).

Les impacts d'une telle intensification des prélèvements ont fait l'objet d'une analyse bibliographique, diligentée par l'Ademe via le GIP Ecofor, sur la base de nombreuses publications souvent en contexte tropical ou boréal/sub-boréal (Achat *et al.*, 2015). Les réponses des écosystèmes apparaissent très contrastées selon la zone biogéographique de l'étude :

- en **forêt tropicale**, les effets d'un prélèvement accru de biomasse (récolte des grumes + résidus d'exploitation + litières) sont rapidement détectables : diminution très rapide de la biomasse microbienne (Mendham *et al.*, 2002) et diminution progressive des taux de minéralisation du carbone et d'azote (O'Connell, 2004), baisse de production en volume en moins de 7 années après exploitation (Laclau *et al.*, 2010 ; Nzila *et al.*, 2002) ;
- en **zone boréale et sub-boréale**, les impacts peuvent être plus lents à apparaître : diminution des taux de minéralisation du carbone et d'azote 10 à 30 ans après une exploitation par arbre entier (Smolander *et al.*, 2010 ; Powers *et al.*, 2005), diminution des stocks de carbone et d'éléments nutritifs (N, P, Mg, Ca, K) 15 à 25 après (Thiffault *et al.*, 2011 ; Tamminen *et al.*, 2012). Sur les peuplements résineux boréaux,

les pertes de production en surface terrière et en volume se généralement font ressentir 10 ans après la récolte d'arbres entiers (Hemilsaari *et al.*, 2011).

Agents essentiels de la dégradation, du recyclage des matières organiques et donc de la fertilité, la faune et les communautés microbiennes (champignons et bactéries) du sol peuvent aussi subir les conséquences d'une récolte accrue de biomasse forestière, avec des effets tout autant contrastés. Si certaines études sous climat boréal ne montrent aucun impact négatif des prélèvements de menus-bois sur la diversité biologique du sol, d'autres indiquent clairement, en zone boréale et sub-boréale, une modification de la composition des communautés microbiennes (Hartmann *et al.*, 2012) ou une diminution de la densité de mycorhizes et de la richesse en champignons mycorrhiziens trente ans après la récolte des houppiers (Mahmood *et al.*, 1999). Ces pratiques perturbent également certains macro-arthropodes décomposeurs des litières (collembolles, araignées, insectes, acariens) qui voient leur abondance chuter dès cinq ans après la récolte. Un suivi mené sur pineraies en Suède a illustré que leurs populations demeuraient modifiées jusqu'à quinze ans après l'exportation (Bengtsson *et al.*, 1997).

En France, le guide « rémanents » de l'ADEME et le rapport « Resobio »

Sur la base de diagnostics à dire d'experts, l'ADEME a publié un guide pratique pour « *La récolte raisonnée des rémanents en forêt* » (Cacot *et al.*, 2006). Il fournit une typologie de la sensibilité des sols à l'exportation des rémanents, fondée sur des critères faciles à mettre en œuvre sur le terrain : texture des sols, type d'humus, groupes floristiques. Selon le niveau de fertilité et de sensibilité des sols, ce guide « rémanents » propose des recommandations de gestion et des scénarios intégrant ou non la récolte

des rémanents ainsi que différents niveaux possibles de compensation par amendement. Nécessairement restrictif et incomplet, ce premier guide doit être révisé et enrichi grâce à l'actualisation des connaissances (rapport « Resobio » ; Landmann et Nivet (coord.), 2014), afin d'affiner le diagnostic de sensibilité, qui jusqu'ici repose pour l'essentiel sur la texture du sol et la géologie. Il s'agit notamment de prendre en compte la dimension biologique de la fertilité des sols et d'introduire des préconisations de préservation de la biodiversité inféodée au bois mort. Mais l'exercice reste délicat dans nos contextes tempérés et le réseau MOS doit permettre à l'avenir d'avancer sur des bases plus solides.

Le réseau MOS : principes de constitution d'un dispositif original

Le réseau expérimental Matière Organique des Sols est conçu pour suivre les impacts d'une modification de la quantité de matière organique sur les sols et les peuplements forestiers sur une durée minimale de 30 ans. La dégradation des chutes annuelles de litière et du bois au sol alimente les réseaux trophiques sur lesquels repose l'équilibre des écosystèmes forestiers. Ce recyclage des matières organiques par la faune du sol et ses communautés microbiennes (champignons décomposeurs et bactéries) assure une part essentielle de la fertilité et revêt une fonction d'autant plus importante que le sol est pauvre. L'exportation de la biomasse issue des résidus d'exploitation représenterait une rupture brutale des cycles biogéochimiques. Un tel dispositif expérimental, étudiant les effets d'une perturbation majeure de l'écosystème, apparaît complémentaire de sites d'observation comme les sites du réseau SOERE (sites ateliers et réseau RENECOFOR), qui suivent les évolutions naturelles sur le long terme du contexte forestier général.

Un dispositif pluridisciplinaire

Le réseau a été conçu de façon pluridisciplinaire pour étudier le fonctionnement des écosystèmes forestiers à diverses échelles, de celle des microorganismes jusqu'à celle du peuplement. Constitué de 18 sites expérimentaux répartis sur une large moitié nord du territoire métropolitain (figure 1), il doit servir de support à la compréhension des écosystèmes forestiers, en ciblant en particulier :

- les effets des prélèvements de biomasse sur les propriétés du sol et des flux biogéochimiques ;
- les effets des prélèvements de biomasse sur les communautés du sol et du bois mort : macrofaune, mésofaune et microfaune (bactéries et champignons) ;
- les effets d'une compensation des exportations par retour en forêt des cendres de chaufferie-bois ;
- les effets des prélèvements de biomasse sur la croissance et la productivité des peuplements à moyen ou long terme.

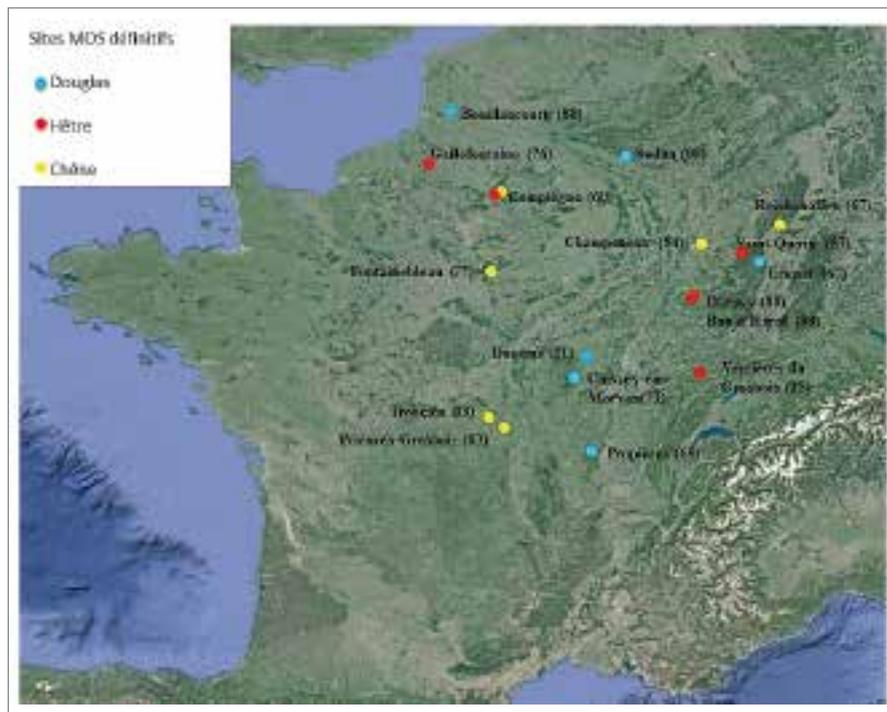


Fig. 1 : carte des sites expérimentaux du réseau MOS

Site	Essence	Propriété	Age (en 2017)	Altitude	Précipitations annuelles moyennes (mm/an)	pHeau (0-5cm)	Humus
Champenoux (54)	chêne	domaniale	40 ans	280	780,9	5,1	eumull/mesomull
Compiègne (60)	chêne	domaniale	25-30 ans	180	734,5	5,2	mesomull
Fontainebleau (77)	chêne	domaniale	25-50 ans	135	697,8	4,4	moder
Prieuré Grosbois (03)	chêne	domaniale	40 ans	319	795,4	4,6	dysmull
Reichshoffen (67)	chêne	communale	40 ans	270	844,5	4,8	mesomull/dysmull
Tronçais (03)	chêne	domaniale	50 ans	270	797	5,1	mesomull/dysmull
Ban d'Harol (88)	hêtre	domaniale	30-35 ans	185	1092,3	4,7	mesomull
Compiègne (60)	hêtre	domaniale	40 ans	180	749,4	4,8	mesomull
Darney (88)	hêtre	domaniale	30-40 ans	500	1128,4	4,5	mesomull/oligomull
Gaillefontaine (76)	hêtre	privée	40 ans	265	912,9	4,1	eumull/mesomull
St Quirin (57)	hêtre	domaniale	30-35 ans	400	1083,8		dysmull
Verrière du Grosbois (25)	hêtre	domaniale	50-60 ans	585	1243,5	4,4	mesomull/oligomull
Bouillancourt (80)	douglas	privée	25 ans	147	687,0	3,8	mesomull
Duesme (21)	douglas	domaniale	30 ans	320	789,0	-	dysmull
Sedan (08)	douglas	domaniale	30 ans	155	899,0	-	-
Chissey en Morvan (71)	douglas	privée	27 ans	600	825,0	-	mesomull
Propières (69)	douglas	privée	26 ans	950	878,0	-	mesomull
Urmatt (67)	douglas	privée	17 ans	700	845,0	-	mesomull

Tab. 1 : caractéristiques principales des 18 sites MOS

Par ces différentes approches, en testant des prélèvements d'intensité croissante, il vise à déterminer le niveau de résistance et de résilience des écosystèmes forestiers et identifier, s'il existe, un seuil de non-retour à l'équilibre des flux et / ou des seuils de richesses microbiennes (ou identification d'espèces clé de voûte) à partir desquels la restauration de l'équilibre n'est plus possible (point de basculement).

Il a vocation à suivre les réponses de l'écosystème forestier sur un pas de temps minimum de vingt à trente ans.

Sélection des sites

Le premier critère est de travailler sur des **peuplements de plaine et de collines** représentatifs de la forêt française et susceptibles de faire l'objet d'un prélèvement plus intense de biomasse forestière. Nous avons d'emblée exclu les massifs d'altitude : du fait de leur difficulté d'accessibilité et d'exploitabilité, ils ne représentent pas un gisement prioritaire de biomasse pour la filière bois-énergie. Trois essences d'intérêt économique de la forêt française seront étudiées : le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) et le Douglas (*Pseudotsuga menziensis* Mirb.). Ces essences constituent une part importante de la production de bois d'œuvre et de construction en France.

Le réseau est construit de façon à couvrir un large spectre de conditions pédoclimatiques et prend en compte divers niveaux de fertilité de sol (cf. tableau 1), en veillant à ce que chaque site corresponde à une station *a priori* homogène et en excluant les situations très contraignantes comme la présence d'engorgement, de forte pente ou de sols superficiels. De même, les sites ont été choisis dans l'aire actuelle de production des essences étudiées, tout en considérant les aires climatiques futures modélisées pour 2100 (Badeau et al., 2004). Ainsi, pour le hêtre, deux sites (Compiègne et Gaillefontaine) ont été choisis en région Grand-Ouest, où sa présence est remise

en question pour l'horizon 2100 en raison des conditions hydriques qui deviendraient de plus en plus défavorables (Rendez-vous techniques ONF, hors-série 2007). Ces deux sites feront office de « sentinelles » face aux effets cumulés des exportations intensifiées de biomasse et des éventuelles modifications climatiques.

La phase de prospection s'est déroulée entre octobre 2012 et juin 2013 pour le choix des sites chêne et hêtre, et s'est étendue jusqu'au printemps 2016 pour les sites Douglas. Elle a consisté, pour chaque essence, à visiter 10 à 15 parcelles réparties sur des massifs différents pour en retenir six. Sur les 18 sites du réseau, onze sites feuillus et deux sites Douglas sont en forêt domaniale ou communale (cf. tableau 1). Une convention cadrant les travaux effectués et la gestion de chaque site a été signée entre l'INRA, représenté par l'unité BEF porteuse du projet, et le propriétaire de la forêt, qu'elle soit publique ou privée.

Pour les sites feuillus, les opérations de caractérisation initiale du sol et du peuplement ont été réalisées au cours du printemps 2013 ; pour les sites Douglas, elles ont commencé courant 2016 et se poursuivront au premier semestre 2017.

Critères sylvicoles et modalités testées

Pour des raisons pratiques, il a été décidé de se focaliser sur des **peuplements purs** issus de plantation ou de régénération naturelle. Le mélange d'essences compliquerait très sérieusement les opérations de suivi à long terme et l'évaluation des exportations minérales (la composition chimique du bois et des litières varie selon les essences). De plus, le fonctionnement biogéochimique des sols (minéralisation de l'azote, du carbone, flux d'éléments nutritifs) ainsi que la composition spécifique des communautés d'organismes (en particulier des champignons) diffèrent sous peuplements mélangés.

Et enfin, on a fait le **choix original** de se placer au **maximum de l'accroissement courant annuel** ($m^3/ha/an$), alors que les réseaux existants sur l'étude des exportations de biomasse sont pour la plupart calés sur la coupe finale. Cette phase du développement est cruciale pour l'étude des cycles biogéochimiques car c'est à ce stade que les prélèvements en éléments nutritifs dans le sol sont les plus importants. L'essentiel des besoins de l'arbre est couvert par ce qui provient du sol alors que la part des translocations internes



Anthina flammea, champignon spécifique de la litière de Hêtre

M. Buée, INRA

y est encore peu importante. En outre, la période d'accroissement maximal coïncide avec l'âge de la première éclaircie, susceptible d'être mécanisée et commercialisée en bois-énergie, houppier compris. Elle se situe entre 20 et 30 ans pour le Douglas, et entre 30 et 60 ans pour les feuillus selon les régions et les classes de fertilité.

Quatre modalités de traitement des rémanents sont étudiées, qui présentent un niveau croissant d'exportations de biomasse.

- **Témoin** : le peuplement est éclairci selon la sylviculture menée actuellement, en laissant sur place les rémanents après exploitation.
- **Sans rémanents** : lors de chaque éclaircie, tous les menus-bois et le houppier sont exportés en même temps que la grume.
- **Compensation** : l'arbre entier est récolté (houppier et grume) mais l'exportation de biomasse et certains nutriments (Ca, Mg, P) est compensée par un apport de cendres issues de chaufferie-bois. Leur composition est préalablement déterminée en laboratoire.
- **Sol nu** : l'arbre entier est exploité lors de l'éclaircie et la litière est récoltée chaque année après la chute des feuilles. Cette modalité, qui n'a aucune réalité sylvicole actuelle, permettra d'observer des réactions extrêmes de l'écosystème (accélération de l'apparition d'un potentiel point de basculement).

Chaque site expérimental dispose d'une **surface minimale de 2 ha**, sur laquelle les traitements sont répétés trois fois. Un traitement est établi sur un plateau de **40 m par 40 m** ; cela correspond à la surface minimale avec un nombre d'arbres suffisant pour rester représentatif d'un peuplement, une condition essentielle pour suivre la productivité sur la durée de l'expérimentation.

Caractérisation initiale fine des sites expérimentaux MOS

Pour pouvoir faire un suivi pertinent sur plus de vingt ans, il est indispensable de décrire le plus finement possible l'état initial de chaque site expérimental avant l'installation des dispositifs, de façon à prendre en compte l'hétérogénéité initiale dans l'implantation des différentes modalités et limiter les biais ultérieurs. Cependant, si la description des peuplements est relativement aisée selon les méthodes d'inventaire classiques, caractériser finement la variabilité du sol sur 2 ha présente des difficultés : l'effort d'échantillonnage considérable que cela suppose s'accompagne ensuite, pour les analyses chimiques traditionnelles, d'un coût élevé et de délais fâcheux. Nous avons donc cherché un outil de substitution rapide, efficace et peu coûteux capable de décrire les propriétés des sols ; nous avons utilisé la spectrométrie proche et moyen infrarouge (NIRS/MIRS) et nous avons pu mettre au point une méthode particulièrement efficace.

Échantillonnage : prélèvements de sol et inventaires dendrométriques

Sur le terrain, il s'agit d'abord de quadriller la zone d'étude d'environ 2 ha selon un maillage de 20 m par 20 m relevé par GPS (Trimble Geo5T). Tous les 20 m, le point de prélèvement est matérialisé par un jalon et identifié selon sa position sur le maillage systématique par un couple lettre/numéro (numérotation des lignes et colonnes). La litière y est collectée sur un carré de 50 cm de côté. Sur ce même carré, on prélève trois carottes de sol qu'on segmente en 3 tranches de profondeur : 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm. Ces carottes sont ensuite assemblées en un seul échantillon homogénéisé par point et par profondeur, puis conditionnées pour des analyses ultérieures en laboratoire.

Selon la configuration de la parcelle, 70 points par site en moyenne ont été échantillonnés. La plupart du temps, les prélèvements ont été faits sur une surface légèrement supérieure aux 2 ha requis afin d'avoir une marge de manœuvre en cas d'aléas du terrain. À raison de 4 niveaux de prélèvement (litière + 3 profondeurs de sol), nous avons collecté en moyenne 277 échantillons par site, soit un total de 3320 échantillons pour les 12 sites feuillus. Après chaque campagne de terrain, les échantillons de sol ont été préparés pour les analyses spectrométriques et chimiques (tamisage, séchage, broyage).

Deux fosses pédologiques ont aussi été creusées à la périphérie de chaque dispositif pour une description des sols sur profil complet (description des horizons sur 1 m de profondeur). Ainsi, la collecte du sol et l'étude des profils renseignent un nombre conséquent de paramètres physico-chimiques des sols.

Pour les inventaires dendrométriques, les relevés ont été faits tous les 40 m sur 2 placettes circulaires concentriques (n = 12) :

- placette de 3 m de rayon : toutes les tiges sont mesurées ;
- placette de 5 m de rayon : sur la couronne entre 3 et 5 m de rayon, seules les tiges dont la circonférence est supérieure à 20 cm sont mesurées. On mesure aussi la hauteur des 3 plus gros arbres inventoriés sur l'ensemble de la placette.

Ces données ont permis de caractériser les peuplements sur l'ensemble de chaque dispositif à partir de calculs dendrométriques basiques : diamètre moyen, surface terrière, nombre de tiges à l'hectare et hauteur dominante.

Cartographier la variabilité des sols grâce à la spectrométrie infra-rouge, sans les analyses classiques

La méthode repose sur le principe de réflexion d'un rayon infrarouge sur la surface de l'échantillon. Le signal est renvoyé sous forme d'un spectre unique, signature propre à chaque échantillon selon ses propriétés physiques et chimiques. Fréquemment employée en sciences du sol, la spectrométrie infrarouge est utilisée dès les années 1970 pour décrire la nature des matières organiques et des argiles. Ses usages sont ordinairement à but prédictif : après calibration avec des données mesurées, cet outil rend très finement compte des concentrations en divers éléments chimiques du sol (carbone, azote, éléments nutritifs, etc.), de propriétés chimiques (pH, CEC) ou physiques comme la texture du sol. Mais ici, on a développé une nouvelle idée : puisque les spectres infrarouges sont le reflet fidèle des propriétés physico-chimiques des sols, on peut les exploiter directement – sans chercher à les élucider – pour apprécier les variations spatiales ou les gradients existants.

Les sols échantillonnés sur chaque site MOS ont été analysés par spectrométrie NIRS/MIRS (Vertex 70, BRUKER) (figure 2) sur le site INRA de Champenoux. Les données spectrales (valeur d'absorbance dans chaque fréquence IR) sont compilées dans un tableau pour chaque site et chaque profondeur. Elles font ensuite l'objet d'un traitement statistique par ACP (analyse en composantes principales) qui permet de mettre en évidence rapidement la variabilité des échantillons entre eux. Ce traitement affecte à chaque échantillon une coordonnée unique sur un « axe » qui illustre son niveau de similarité avec tous les autres échantillons (cf. encadré n° 1). Les coordonnées d'ACP des échantillons sont associées aux coordonnées GPS des points de sondage. On peut ainsi cartographier les résultats d'ACP,

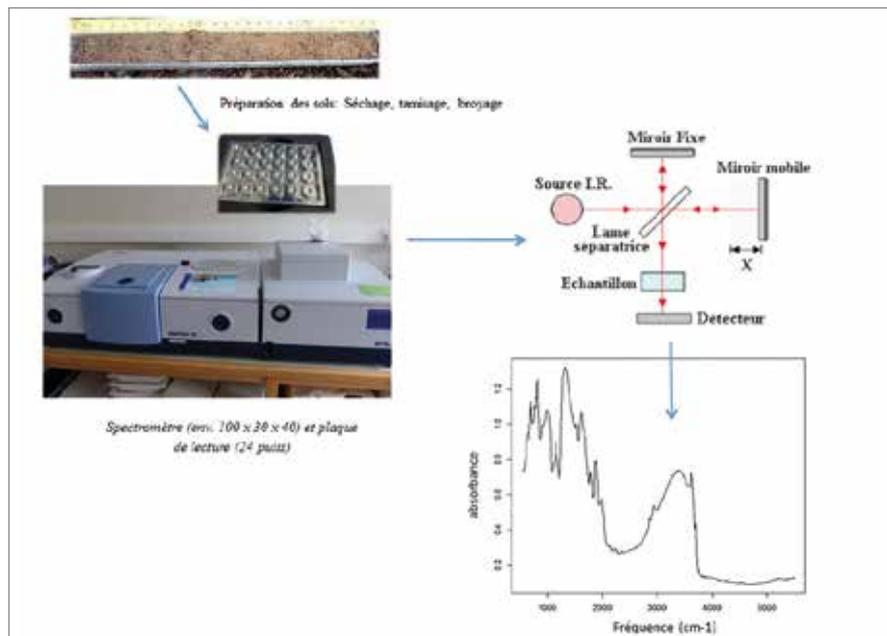


Fig. 2 : étapes depuis le prélèvement de sol sur le terrain jusqu'à l'obtention d'un spectre infrarouge

Mode opératoire : on place quelques mg de sol sec et broyé dans une cupule de la plaque de lecture en métal qu'on introduit dans le spectromètre. En raison de la très faible quantité de matériel utilisé pour l'analyse, la mesure est répétée trois fois pour chaque échantillon de sol (répétition « machine »). L'appareil fournit alors un spectre unique par échantillon, sorte « d'empreinte digitale » du sol.

1 – Méthode statistique pour une approche de la variabilité spatiale du sol par la spectrométrie infrarouge

Principe de l'ACP

L'Analyse en Composantes Principales est une méthode descriptive de statistique multivariée qui permet de traiter des jeux de données quantitatives parfois considérables. Elle en résume l'information sous forme de graphiques qui permettent d'identifier les niveaux de dissemblance/similarité entre les individus en fonction de l'ensemble des variables. L'ACP permet aussi de hiérarchiser les variables entre elles et de mettre en évidence les corrélations entre elles.

Avec un tableau à n individus (lignes) X p variables (colonnes), les relations entre les individus peuvent se représenter graphiquement sur autant d'axes que de variables, donc p axes. Le principe de l'ACP consiste à projeter la variabilité entre les individus sur un minimum d'axes indépendants (les « composantes principales ») correspondant à des combinaisons linéaires des p variables. Les axes d'ACP ne représentent donc pas un facteur particulier mais demeurent interprétables à partir des coefficients des combinaisons entre variables. Le 1er axe de l'ACP est celui qui explique la plus grande part de variabilité entre les données. Les individus sont projetés sur chaque nouvel axe et repérés par des coordonnées. Pour exemple : si 3 axes sont suffisants pour expliquer l'ensemble de la variabilité du jeu de données, les individus ne sont plus caractérisés par p variables mais seulement par 3 coordonnées, une par axe explicatif.

Application aux spectres NIRS/MIRS des sols du réseau

Dans le cas de l'analyse spectrale des sols du réseau MOS, les individus sont les échantillons de sol, identifiés par leur position repérée sur le terrain et par leur horizon, et les variables sont l'ensemble des fréquences d'absorbance des spectres (2500 variables en moyen infrarouge et 4044 en proche infrarouge). Ici, le 1er axe de l'ACP explique toujours plus de 90 % de la variabilité entre individus. Les coordonnées des échantillons sur le 1er axe donnent alors accès rapidement et de façon complète aux éventuels gradients ou hétérogénéités spatiales existantes sur un site.

c'est-à-dire établir des cartes de variabilité des propriétés du sol pour chaque site (figure 3). Cette méthode est appliquée à chaque profondeur de sol échantillonnée pour décrire l'hétérogénéité sur la litière et sur les 20 premiers cm du sol minéral.

Déterminer la disposition des traitements en fonction de l'hétérogénéité du sol et du peuplement

Dans un tableau récapitulatif, chaque point de prélèvement est associé à ses coordonnées issues de l'ACP sur les données spectrales, et aux caractéristiques « peuplements » obtenues après les inventaires sur le terrain. La disposition des 4 traitements au sein de chacun des sites MOS fait ensuite l'objet d'un tirage aléatoire, puis on vérifie statistiquement par analyses de variance les éventuelles interactions entre les traitements et la variabilité du sol et du peuplement :

il ne faut aucune interaction initiale entre l'emplacement des modalités et l'hétérogénéité du site afin de proscrire tout biais expérimental par la suite. Tant que de telles interactions subsistent, on recommence le tirage aléatoire jusqu'à obtenir une configuration qui ne présente aucune relation entre traitements et sol et/ou peuplement. Cette méthode systématique permet d'implanter ensuite les modalités sur le terrain tout en tenant compte de la variabilité existante à l'échelle du site expérimental.

Confirmation méthodologique par les analyses chimiques de sol

Avant la mise en place effective des modalités, nous avons validé cette approche de cartographie des sols par ACP sur les données NIRS-MIRS en confrontant les résultats de la spectrométrie à ceux des analyses classiques, réalisées par le laboratoire

INRA d'Analyses des Sols à Arras : pH (eau et KCl), éléments totaux (C, N, K, Ca, Na, Mg, Mn, Al, Fe, P), CEC, texture et granulométrie. Pour limiter les délais et les frais d'analyses, les échantillons ont été assemblés de manière à n'avoir pour chaque site qu'un seul échantillon composite par traitement et par profondeur (soit 4 échantillons par profondeur). Ces analyses ont bien confirmé l'absence d'effet initial de l'hétérogénéité des sols sur les traitements.

Le réseau MOS a donc été support de la mise au point d'une méthode rapide et efficace d'implantation des dispositifs expérimentaux en forêt (Akroume *et al.*, 2016). La spectrométrie infrarouge permet bien d'appréhender rapidement la variabilité du sol dans sa globalité, même si on n'identifie pas les facteurs chimiques ou physiques discriminants. Le gain de temps apporté par la spectrométrie infrarouge est encore amélioré par le développement récent de spectromètres portables de terrain.

Au-delà de la validation méthodologique, ces analyses ont deux finalités distinctes : (i) servir de références dans le suivi de la fertilité des sols du réseau ; (ii) calibrer les spectres et les données chimiques pour, à l'avenir, utiliser la spectroscopie IR comme un outil fiable de mesures de concentrations d'éléments chimiques (notamment carbone et azote) dans le suivi du réseau MOS.

Description initiale de la diversité fongique des sols

Les communautés fongiques sont essentielles au fonctionnement des écosystèmes forestiers de par leur rôle de décomposeurs des matières organiques et de symbiontes des arbres forestiers dans le cas des champignons mycorhiziens. Le réseau MOS s'intéressant autant à la composante chimique qu'à la composante biologique de la fertilité, la diversité fongique y a été étudiée sur les mêmes échantillons que ceux prélevés pour les analyses chimiques.

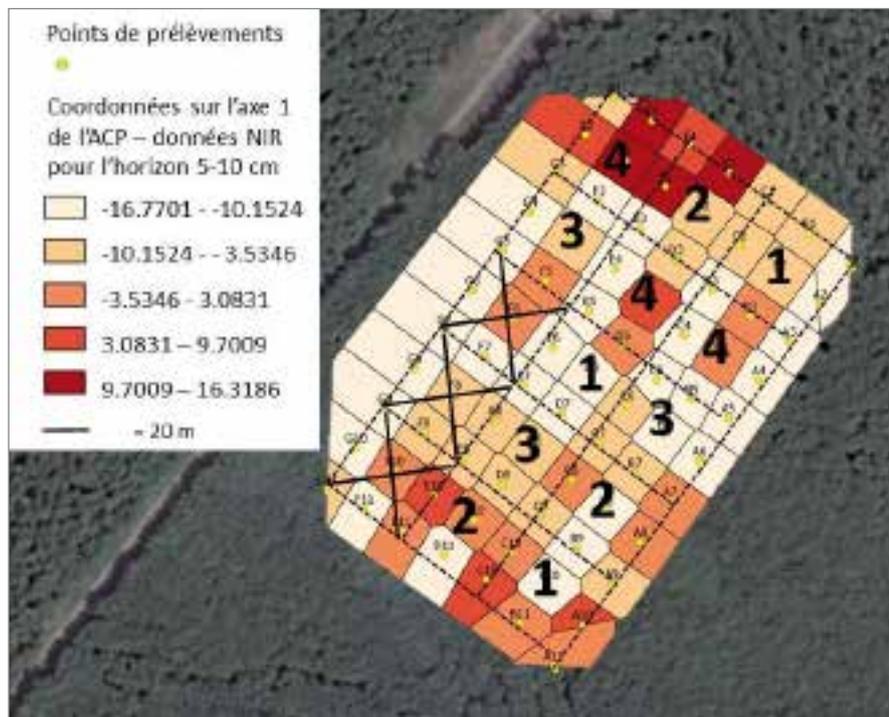


Fig. 3 : exemple de carte de variabilité du sol obtenue à partir des données NIRS pour le site de Ban d'Harol (88)

La disposition des traitements, numérotés de 1 à 4 y a été superposée. La prospection ayant été menée sur plus de 2 ha, 3 placeaux sont surnuméraires (placeaux barrés d'une croix). Les points en jaune représentent les points de sondage. Les coordonnées GPS ont été relevées pour une partie des points, celles des autres points ayant été calculées par interpolation. Ceci explique l'irrégularité de certains polygones.

Les valeurs des « coordonnées ACP » ont été groupées en classes arbitraires et ne représentent pas une « grandeur » particulière. Elles rendent globalement compte de la variabilité du sol sur ce site.

Elle a été appréhendée à partir des méthodes de génomique environnementale : l'ADN présent dans le sol est extrait puis des régions spécifiques des génomes fongiques sont séquencées. L'identification taxonomique peut être effectuée jusqu'au niveau de l'espèce dans le meilleur des cas, sinon au niveau du genre ou de la famille. On obtient une liste des taxons présents par échantillon de sols. Malgré le temps de préparation des échantillons en laboratoire, ces nouvelles technologies sont le moyen le plus pertinent d'étudier les communautés fongiques compte tenu de l'ampleur de l'effort d'échantillonnage sur ce dispositif. Ces méthodes permettent une approche de la diversité locale plus complète que les inventaires classiques d'après l'observation des fructifications.

En effet, étant conditionnés par les cycles saisonniers des espèces et les aléas climatiques, les relevés de carpophores ne reflètent pas la richesse fongique réelle et restreignent l'étude aux seuls champignons épigés ; de nombreux taxons telluriques (notamment responsables de la dégradation des matières organiques) sont alors exclus.

Les méthodes de génomique environnementale donnent accès à la richesse spécifique du sol très longtemps sous-estimée (Horton et Bruns, 2001). Elles offrent l'avantage supplémentaire de pouvoir travailler *a posteriori*, plusieurs mois après prélèvement, sur des échantillons de sols prélevés en toutes saisons puis stockés et conservés à -20 °C pour éviter la dégradation de l'ADN.

Installation et suivi du réseau MOS : de la pelleteuse au laboratoire

Conformément aux critères de sélection des sites, la mise en place des traitements intervient à la première éclaircie (ou la deuxième pour certains sites), après la coupe, une fois que les bois ont été sortis. Les travaux d'exportation des rémanents et des litières ont débuté à l'automne 2013 et s'échelonnent sur les différents sites en fonction des calendriers sylvicoles et de la disponibilité des équipes. Le protocole n'intervient pas dans la sylviculture, qui reste l'affaire du gestionnaire (ONF ou privé), le but étant de s'appuyer sur des pratiques sylvicoles locales en vigueur. Pour la plupart des sites feuillus, la coupe est réalisée manuellement par des

cessionnaires ou affouagistes pour un usage de bois de chauffage. L'exploitation concerne la tige et le houppier jusqu'à la découpe 7 cm et les menus-bois (<7 cm) sont laissés sur place et éparpillés au sol. Cependant sur les deux sites de Compiègne (plantation de chêne sessile et de hêtre), l'exploitation a été effectuée de façon mécanisée et n'a laissé que très peu de rémanents. Les sites Douglas feront aussi l'objet d'exploitation mécanisée avec ébranchage sur place.

L'installation d'un site nécessite environ 70 hommes jours par site : délimitation des placeaux par des piquets implantés aux angles (avec identification par un code couleur + nom du traitement), puis retrait des menus bois et des litières. La maintenance mobilise environ 15 hommes jours par site pour le retrait annuel des litières (modalité sol nu). Les campagnes de terrain sont pilotées par l'unité BEF de l'INRA de Nancy et impliquent du personnel des organismes partenaires : unité IAM de l'INRA de Nancy, laboratoire Ecodiv de Rouen, ONF (ouvriers forestiers et personnel RDI). Sur la plupart des sites, des équipes de la Protection Judiciaire de la Jeunesse (UEAJ) ont apporté un renfort important.



Fig. 4 : exemples de placeaux après retrait des fagots (à gauche) et après retrait de la litière (à droite)

Mise en place des traitements *in situ*

Les menus-bois et houppiers non exploités sont évacués hors des placeaux à modalité *sans rémanent et sol nu* sous forme de fagots le long des cloisonnements (figure 4). Les retraits de litière sont effectués après l'évacuation des fagots, en soufflant les feuilles de façon à les entasser sur les cloisonnements pour faciliter leur sortie des placeaux. L'utilisation de souffleuses à feuilles (Stihl BR 550) permet d'éviter le décapage violent des racines fines superficielles et l'altération de l'horizon organique que pourraient provoquer l'emploi de râtaux ou d'une herse. Les litières sont évacuées hors du dispositif au fur et à mesure par un quad léger afin de minimiser les impacts de tassement.

Les fagots de menus-bois évacués sont pesés à l'aide d'un peson accroché au bras d'une pelleteuse (figure 5). Pour chaque placeau *sol nu*, les quantités de litières exportées sont évaluées avant le soufflage : la litière est prélevée manuellement sur un m² et pesée à raison de 9 points par placeau, puis on extrapole à l'hectare. En masse sèche, la quantité de menus-bois exportés

varie entre 10 et 20 t/ha selon les sites ; pour les litières, elle varie de 5 à 12 tonnes/ha. Des analyses de composition chimique du bois et des litières sont réalisées en parallèle afin de déterminer précisément la minéralomasse exportée par chacun des traitements.

Sur les modalités de *compensation*, les épandages de cendres ont débuté en 2015 et ont été réalisés manuellement (figure 6). La quantité de cendres apportée (1,5 à 2 t/ha) est équivalente à la quantité d'éléments nutritifs exportés par la récolte des houppiers. Remarque : les cendres étant considérées comme déchets par la réglementation actuelle, leur épandage en forêt à titre expérimental est subordonné à l'obtention d'une autorisation spéciale de la part des DREAL concernées, après analyse des teneurs en métaux lourds pour en vérifier l'innocuité.

En janvier 2017, 10 des sites feuillus sont installés complètement et régulièrement suivis. Les traitements sur les sites de l'Allier (Tronçais et Grosbois) ne sont pas encore mis en place et les sites douglas sont en cours de chantier.

Suivi du réseau

Le dispositif fait l'objet de nombreux suivis faisant appel à diverses disciplines et à des technologies de pointe :

- croissance des arbres et évolution de la productivité du peuplement ;
- fertilité et fonctionnement du sol : minéralisation du carbone et de l'azote, concentrations des éléments chimiques, activités enzymatiques liées à la dégradation de la matière organique par les microorganismes ;
- richesse et diversité biologique : inventaire de macro – et mésofaune (lombricidés, enchytréides, etc.), biomasse microbienne, diversité fongique par inventaires de fructifications et par génomique environnementale.

Pour une compréhension complète des processus en jeu, certains sites sont équipés de stations météorologiques et de sondes (Decagon EC 5) pour le suivi de l'humidité du sol à différentes profondeurs. Le suivi des sites mobilise également une plate-forme mobile, M-POETE², permettant de faire des analyses de laboratoire *in situ* et équipée d'outils

² Mobile Platform for the Observation and the Experimentation on Terrestrial Ecosystems



Fig. 5 : pesée d'un fagot à l'aide d'un peson fixé au bras de la pelleteuse



Fig. 6 : épandage manuel de cendres sur un site MOS

2 – Quelques résultats

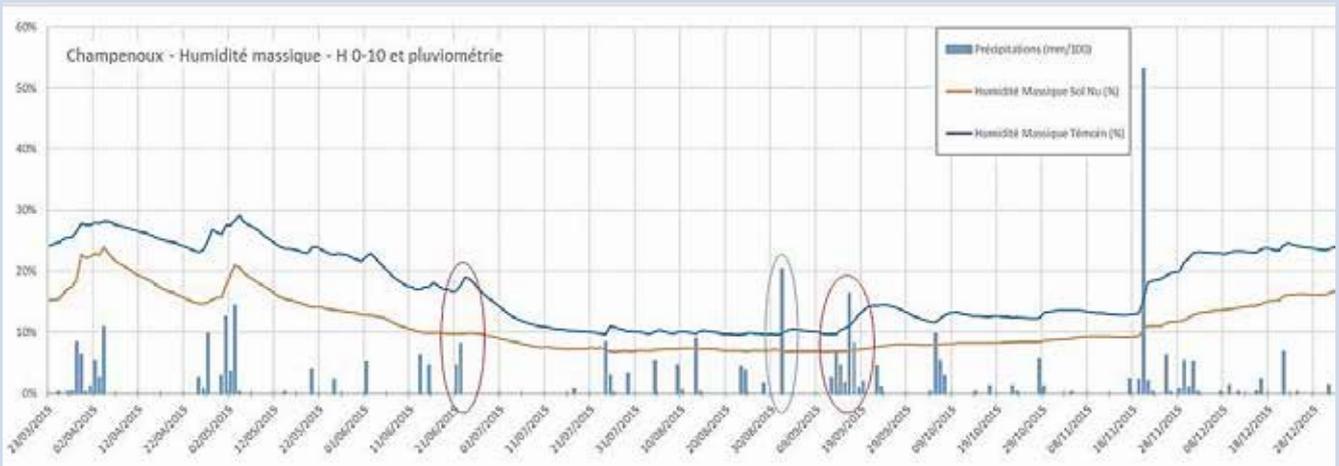
Sans litière, le sol a soif... mais ne boit plus...

Sur le site de Champenoux, l'humidité du sol sur les 10 premiers cm et la pluviométrie sont suivies mensuellement depuis mars 2015. Le sol sans litière (courbe marron) est toujours nettement plus sec que le sol témoin (courbe bleue). Pas étonnant, étant donné le rôle de rétention de l'humidité de la litière forestière...

En revanche, alors qu'humidité et pluviométrie sont étroitement corrélées, on a observé, depuis la sécheresse du printemps 2015, que le sol sans litière ne réagissait plus aux

précipitations : il a plu mais l'humidité du sol restait très faible (ellipses rouges). Noter que les sols ont connu pendant l'été 2015 un important niveau de sécheresse ce qui explique que même les sols témoin n'aient pas vu leur humidité augmenter lors de la pluie d'orage du 31/08/2015 (ellipse bleue), comme une éponge trop desséchée qui perd sa capacité d'absorption immédiate.

Néanmoins, ils réagissent aux précipitations suivantes contrairement aux sols nus qui ne voient leur humidité ré-augmenter que très lentement.

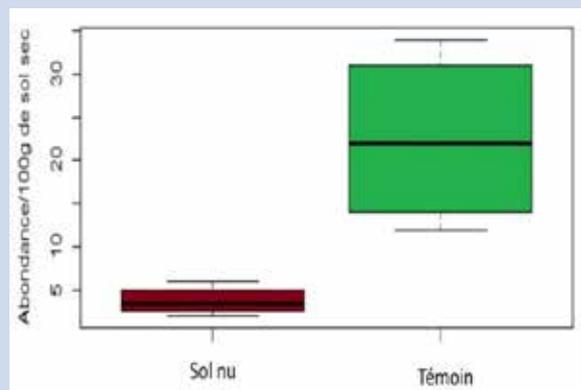


Un impact sur la faune du sol ?

La biomasse de vers enchytréides (mésafaune) a été estimée en 2015, soit un an après l'installation, sur 6 sites (3 sites hêtre et 3 sites chêne) dans l'horizon de surface (0-5cm) et comparée entre placeau témoin et sol nu.

Ces premiers résultats indiquent une baisse significative de l'abondance des enchytréides quand la litière a été retirée.

Deux causes possibles : la disparition de la ressource nutritive et/ou, plus probablement, la disparition de l'habitat favorable (Élie, 2015).



(d'après Elie, 2015)

divers : drone, LIDAR (aérien et terrestre), spectromètre infrarouge, etc. Pour prendre en compte les effets à très court terme, des échantillons de sols sont prélevés tous les ans à l'automne et conservés ; ils feront l'objet d'analyses des potentiels de minéralisation de l'azote et du carbone, ainsi que d'analyses de la biomasse et de la diversité fongique.

Les premières campagnes de suivi ont déjà fourni quelques informations intéressantes concernant les activités biologiques des microorganismes, ou encore la faune et l'humidité du sol (cf. encadré 2).

Quelques projets en cours : du microorganisme au peuplement forestier...

Le réseau est devenu support de divers projets scientifiques ou plus appliqués. Depuis sa mise en place en 2013, plusieurs stages universitaires (M1, M2) ont été effectués dans ce cadre, ainsi qu'une thèse achevée en 2015 sur l'élaboration du réseau et les effets à très court terme des manipulations de matière organique (Akroume, 2015). Deux thèses ont débuté en 2015, respectivement sur les liens entre fonctionnement de la diversité fongique et phénologie des arbres, et sur les impacts des exportations de biomasse sur la macrofaune. Le projet BRIDGE³ (2015-2018) de l'INRA Nancy s'appuie aussi sur le réseau pour étudier les mécanismes de la croissance racinaire du chêne, du hêtre et du douglas en fonction de la disponibilité en nutriments et en eau.

Enfin le projet RESPIRE (REcolte des menus bois en forêt : Potentiel, Impact et Remédiation par Epanchage de cendres), auquel contribue l'ONF RDI, a été spécialement bâti autour du réseau MOS et pour exploiter les données qui y sont récoltées.

Le champ des domaines impliqués est vaste, depuis la biogéochimie et l'écologie des sols jusqu'à l'économie

forestière et la simulation d'itinéraires sylvicoles. Un des volets en cours consiste estimer la biomasse et la minéralomasse des menus-bois exportés sur des itinéraires sylvicoles complets, en faisant différentes hypothèses d'exploitation des menus-bois. On simulera différents scénarios sylvicoles à l'aide des modèles de croissance Fagacées (pour hêtre et chêne), en partant des peuplements et des exportations réels des sites MOS et en faisant varier les quantités de menus-bois exportés, les durées de rotation, l'intensité des coupes, etc. Ce volet fera aussi appel à l'outil ForEnerChips, conçu pour évaluer les bilans énergétiques et les exportations minérales sur l'ensemble de la filière de mise à disposition de biomasse forestière pour l'énergie (Bilot, 2014). Ces simulations aideront à la réflexion pour la définition d'itinéraires « durables » adaptés aux contextes étudiés.

Ce qu'on attend de ce dispositif

Le réseau MOS permettra d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement biogéochimique des sols forestiers, leur faune et leurs communautés microbiennes, et sur la croissance aérienne et racinaire des arbres. Par son approche pluridisciplinaire, il a des ambitions relevant autant des sciences fondamentales que des sciences forestières appliquées : progresser en taxonomie grâce, en partie, aux méthodes de génomique environnementale, en élargissant les inventaires à d'autres groupes (insectes, flore, etc.) et aux espèces inféodées au bois mort ; comprendre les liens entre fertilité chimique, diversité taxonomique et fonctionnement des sols (processus de dégradation des matières organiques, flux d'éléments nutritifs, etc.) ; établir des relations entre exportation de biomasse et productivité des peuplements ; tester la pertinence des mesures de remédiation. Plus généralement, un dispositif de cette ampleur est indispensable à la compréhension

des effets des types de gestion sur certains écosystèmes forestiers et à l'évaluation des services rendus par ces écosystèmes.

L'intégration des composantes de richesse spécifique et diversité fonctionnelle des sols dans les modèles de croissance/fertilité existants facilitera la compréhension des processus de croissance des peuplements. À plus longue échéance, le réseau MOS aura vocation à l'élaboration d'un ou plusieurs indicateurs de sensibilité des sols aux exportations de menus-bois prenant en compte ces différentes composantes. Appréhender le plus finement possible les facteurs de maintien de la fertilité des sols contribuera ainsi à proposer aux sylviculteurs des pistes de gestion, et des outils de diagnostic adaptés aux peuplements et aux contextes pédoclimatiques.

Emila AKROUME ⁽¹⁾ ⁽²⁾

Bernd ZELLER ⁽²⁾

Marc BUÉE ⁽³⁾

Laurent SAINT-ANDRÉ ⁽²⁾

Arnaud REICHARD ⁽²⁾

Christine GEHIN ⁽²⁾

Cyrille BACH ⁽³⁾

(1) ONF, pôle RDI de Dole

(2) INRA-BEF 54280 Champenoux

(3) INRA-IAM 54280 Champenoux

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont permis la mise en œuvre de ce projet, tout particulièrement les agents patrimoniaux et responsables d'UT : Henri Juif, Michel Leblanc, Pascal Debailleuil, Yves Poirot, Claude Aubailly, Eric Keiser, Élise Vial, Timothée De Ferrières, Alexis Guillon, Bruno Liniger ; les collègues de la forêt privée : Laurent Bissonnier (expert forestier), Bernard Catry (CRPF), A. Barthélémy (expert forestier) ; et les UEAJ de Belfort, Besançon, Montataire, Nancy, Sarreguemines, Strasbourg qui ont fourni un soutien essentiel pour les chantiers de terrain.

³ Biomass Removal Impact on soil Diversity, Geochemistry and Tree Ecophysiology

Financement et partenaires du réseau MOS

Financement

Le réseau MOS a vu le jour grâce au financement de l'ADEME (appel à projet REACTIF 2013) dans le cadre des projets :

- RESPIRE (2014-2016) : REcolte des menus bois en forêt : Impacts et Remédiation par Epanchage
- INSENSÉ (2014-2016) : INDicateurs de SENSibilité des Écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse

Il a été installé à l'aide de la plateforme mobile M-POETE (Mobile Platform for the Observation and the Experimentation on Terrestrial Ecosystems) financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le FEDER dans le cadre de l'infrastructure ANAEE-F. Les unités UR1138 BEF et UMR1136 IAM font l'objet d'un financement par l'ANR dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » (ANR-11-LABX-0002-01, Laboratoire d'Excellence ARBRE).

Organismes partenaires

UR INRA Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers, UMR INRA-Université de Lorraine Interactions Arbres-Microorganismes, UMR INRA-Université de Lorraine Laboratoires Sols-Environnement, département RDI de l'ONF, Laboratoire Ecodiv Université de Rouen.

Porteurs

Bernd Zeller (INRA-BEF), Emila Akroume (ONF, anciennement INRA-BEF et IAM), Marc Buée (INRA-IAM), Laurent Saint-André (INRA-BEF).

Responsables réseau MOS : Bernd Zeller, Laurent Saint-André

Contributeurs

Michaël Aubert (Université de Rouen), Cyrille Bach (INRA-IAM), François Élie (Université de Rouen), Christine Gehin (INRA-BEF), Dominique Gérard (INRA-EEF), Marine Leblanc (UCFF), Joseph Levillain (INRA-EEF), François Maillard (INRA-IAM), Noémie Pousse (ONF), Cyrille Rathgeber (INRA-LERFOB), Arnaud Reichard (INRA-BEF), Claudine Richter (ONF), Lucie Vincenot (Université de Rouen)

Bibliographie

Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L., 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* vol. 348, pp. 124–141

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. Nancy : AgroParisTech.

Akroume E., Zeller B., Buée 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*, vol. 73 (4) pp. 1005-13

Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2004. Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Tâche D1 : Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. ECOFOR n° 2002.17 INRA n° 4154 B

Bilot N., 2014 Comment raisonner la performance énergétique et la durabilité de la filière de mise à disposition de plaquettes forestières pour l'énergie ? *Rev. For. Fr.* vol. 66 (4) pp. 584-588

Bengtsson J., Persson T., Lundkvist H., 1997. Long-term effects of logging residue addition and removal on macroarthropods and enchytraeids. *J. Appl. Ecol.* Vol. 34, pp. 1014–1022

Cacot E., Eisner N., Charnet F., Leon P., Nicolleau C., Ranger J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers : Ademe. 20 p.

Elie F., 2015. Étude de l'augmentation de prélèvements de rémanents forestiers sur la faune du sol. Mémoire de stage de master 2. Université de Rouen, laboratoire Ecodiv

Hartmann M., Howes C.G., VanInsberghe D., Yu H., Bachar D., Christen R., Nilsson R.H., Hallam S.J., Mohn W.W., 2012. Significant and persistent impact of timber harvesting on soil microbial communities in Northern coniferous forests. *The ISME Journal* vol. 6, pp. 2199–2218

Helmisaari H.-S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Liiro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B., 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology and Management*, vol. 261, pp. 1919–1927

Horton T. R., Bruns T. D., 2001. The molecular revolution in ectomycorrhizal ecology: peeking into the black-box. *Molecular ecology*, vol. 10(8) pp. 1855–1871

Landmann G. et Nivet. C (coord.), 2014. « Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. » Rapport final projet RESOBIO. ADEME, Paris : ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt – GIP Ecofor

Laclau J.-P., Levillain J., Deleporte P., Nzila, J. de D., Bouillet J.-P., Saint André L., Versini A., Mareschal L., Nouvellon Y., Thongo M'Bou A., Ranger J., 2010. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management* vol. 260, pp. 2148–2159

Mahmood S., Finlay R.D., Erland S., 1999. Effects of repeated harvesting of forest residues on the ectomycorrhizal community in a Swedish spruce forest. *New Phytologist* vol. 142, pp. 577–585

MEEM, 2017. Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2016. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. Datalab n° 8, 76 p.

Mendham D., Sankaran K., O'Connell A., Grove T., 2002. Eucalyptus globulus harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 34, pp. 1903–1912

Nambiar E. K. S., Cossalter C. et Tiarks A. E. (éd.), 1999. Site management and productivity in tropical plantation forests: workshop proceedings, 16-20 February 1998, Pietermaritzburg, South Africa. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research.

Nzila J. de D., Bouillet J.-P., Laclau J.-P., Ranger J., 2002. The effects of slash management on nutrient cycling and tree growth in Eucalyptus plantations in the Congo. *Forest Ecology and Management* vol. 171(1) pp. 209–221

O'Connell A., 2004. Impact of harvest residue management on soil nitrogen dynamics in Eucalyptus globulus plantations in south western Australia. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 36, pp. 39–48

Powers R., Scott D., Sanchez F., Voldseth R., Page-Dumroese D., Elioff J., Stone D., 2005. The North American long-term soil productivity experiment: Findings from the first decade of research. *For. Ecol. Manage.* vol. 220, pp. 31–50

Smolander A., Kitunen V., Tamminen P., Kukkola M., 2010. Removal of logging residue in Norway spruce thinning stands: Long-term changes in organic layer properties. *Soil Biology and Biochemistry* vol. 42, pp. 1222–1228

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

Thiffault E., Hannam K.D., Paré D., Titus B.D., Hazlett P.W., Maynard D.G., Brais S., 2011. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests - A review. *Environmental Reviews*, vol. 19, pp. 278–309



INRA-BEF



INRA-BEF

Mise en oeuvre des modalités expérimentales sur les sites de Compiègne (en haut) et Champenoux (en bas)