

ATELIERS

COMPENSATION DES EXPORTATIONS MINÉRALES ET REMÉDIATIONS AUX DÉGRADATIONS DES SOLS

Compte rendu de l'atelier 3

ARNAUD LEGOUT – CLAUDINE RICHTER – NOÉMIE POUSSE – GRÉGORY VAN DER HEIJDEN – JEAN-LOUIS MOREL – FRANÇOIS CHARNET – MARIE-ODILE SIMONNOT – JACQUES RANGER

L'objectif de cet atelier était d'apporter des éléments de connaissance et de débat autour des travaux d'ingénierie écologique de remédiation, ou de soutien aux services rendus par les sols, dont la productivité forestière. L'atelier était structuré autour de trois grands sujets :

- le tassement des sols forestiers : les techniques de prévention et de restauration possibles ;
- l'exportation accrue de biomasse forestière et sa compensation par des amendements minéraux ;
- la valorisation des déchets (cas des boues) et des friches industrielles.

Pour initier les échanges, chaque sujet a été introduit par une présentation de la problématique et de solutions techniques testées pour la restauration de propriétés et de fonctions du sol, leur maintien, voire leur amélioration. Quelques éléments d'information ont également été présentés sur l'efficacité de ces solutions (ce qui ne marche pas, ce qui est déjà éprouvé, ce qui est en cours d'évaluation, les besoins de recherche et développement), leur coût et niveau de maîtrise, l'évaluation de leurs impacts à court, moyen et long terme et les bénéfices indirects.

Cet article synthétise les éléments de contexte et les débats ayant suivi les présentations.

LE TASSEMENT DES SOLS FORESTIERS, LES TECHNIQUES DE PRÉVENTION ET DE RESTAURATION POSSIBLES

La mécanisation croissante des opérations forestières, l'augmentation du poids des engins et de leur charge utile, impliquent une augmentation des contraintes mécaniques qui s'exercent sur les sols forestiers.

Retour sur les mécanismes en cause, et les facteurs de risque

Ces contraintes, si elles dépassent la capacité de portance du sol, conduisent à une réorganisation des particules solides entre elles, et notamment à une diminution de la porosité (volume des vides par rapport au volume de sol), une augmentation de la densité (masse volumique) et de la résistance à la pénétration des sols jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre contrainte et déformation. Ainsi, les dégâts aux sols sont plus élevés lors des premiers passages qu'aux passages ultérieurs

(sol de plus en plus compact et résistant aux contraintes), ce qui justifie de concentrer la circulation des engins sur des voies de passage permanentes (cloisonnements).

Les changements de structure des sols lors de la circulation d'engins peuvent limiter l'enracinement des arbres (résistance plus forte pour la pénétration des racines, création d'un milieu horizontalement hétérogène, défavorable à la prospection racinaire sur l'ensemble du sol, transferts d'eau et d'air modifiés) et ainsi diminuer la productivité ou augmenter la sensibilité des peuplements forestiers aux diverses contraintes naturelles (sécheresse, vent, attaques biologiques). La réduction des capacités d'infiltration et de drainage d'eau suite à la déstructuration peut également conduire, lors de fortes pluies, à un risque accru d'érosion sur les terrains en pente ou à un risque accru d'engorgement sur les terrains plats. Le tassement des sols peut aussi modifier la biodiversité, et les fonctions d'épuration de l'eau et de l'air assurées par les écosystèmes forestiers.

L'augmentation progressive de la taille des engins et de leur poids ont été signalés par les participants, ce qui laisse craindre un compactage de plus en plus profond des sols, très difficile voire impossible à restaurer : on aboutirait alors au syndrome de la semelle de labour bien connu en agriculture, dont les conséquences seraient beaucoup plus dommageables en milieu forestier, où la dimension et la longévité des plantes sont d'un autre ordre de grandeur. Il faut donc intervenir le plus en amont possible pour prévenir les dégâts, notamment par la mise en place d'un réseau de cloisonnements d'exploitation adapté, et un effort de diagnostic de praticabilité. De nouveaux matériels montés sur chenilles (prototypes d'engins allemands ou scandinaves) et permettant de diminuer la pression exercée sur les sols font aujourd'hui l'objet de chantiers tests en forêt publique (Augris, 2012). Le retour à des engins de plus petite taille équipés de pneus larges pour diminuer la contrainte par unité de surface a également été évoqué, notamment dans les écosystèmes forestiers présentant une forte sensibilité au compactage.

Afin de prévenir les dégâts au sol lors du passage d'engins, le gestionnaire peut diagnostiquer la sensibilité des sols et interdire la circulation de certains engins sur des sols trop sensibles (engorgés de manière permanente, tourbière...) ou quand l'humidité du sol est trop forte (diminution de la portance) ou quand l'engin exerce une pression trop élevée par rapport à la portance du sol. Le guide PROSOL (Pischedda, 2009) fournit des préconisations générales à suivre en fonction du type de sol et de son humidité, pour ne pas compromettre la qualité physique des sols lors de la circulation d'engins. Des logiciels d'aide à la décision, tel le logiciel ProFor© développé par l'université de Munich, ont également été développés, mais ceux-ci nécessitent des données pas toujours facilement accessibles aux agents de terrain, comme l'humidité du sol au moment du passage de l'engin (Matthies *et al.*, 2006 ; Bénard, 2009).

Quoi qu'il en soit, même si les opérateurs font de leur mieux pour prévenir les dégâts, les dommages sont parfois difficiles à éviter. Se pose alors la question de la restauration de la qualité physique des sols pour éviter un dysfonctionnement de l'écosystème. Différentes techniques de restauration, qui s'inspirent souvent de ce qui est fait en agriculture, sont disponibles. Elles exigent des conditions particulières de mise en œuvre (état d'humidité du sol...), sont d'efficacité variable et entraînent un coût difficilement supportable pour le propriétaire.

La question de la restauration des sols tassés

- *La restauration naturelle des sols*

Les mécanismes et le temps nécessaire à la restauration non assistée de la qualité des sols forestiers tassés restent encore très peu étudiés, car leur compréhension nécessite une approche multidisciplinaire active (forte variabilité des propriétés des sols) sur des dispositifs où les conditions initiales sont contrôlées (sol, contrainte mécanique appliquée, tassement initial) et suivies sur le moyen voire le long terme (Goutal, 2012).

La porosité d'un sol est complexe et résulte souvent de processus variés (biologiques, notamment l'activité des racines et de la faune du sol, et physiques, notamment les cycles d'humectation-dessiccation et gel-dégel) qui se complètent aux différentes échelles de temps et d'espace. Elle est indispensable à toutes les fonctions exercées par les sols : production végétale, épuration de l'eau et de l'air, maintien de la biodiversité. Par conséquent, lorsqu'un sol est déstructuré par le passage d'un engin, il est important que tous les processus à l'origine de la structure du sol puissent agir pour la restaurer. Cependant, les activités des racines et de la faune du sol sont négativement impactées par le tassement et peuvent mettre plusieurs dizaines d'années avant de revenir à leur état antérieur, sans toujours arriver à recoloniser les zones les plus denses du sol (Capowiez *et al.*, 2009). De même, l'efficacité des phénomènes physiques à restaurer la structure du sol peut être réduite par les modifications de transferts hydriques et de chaleur dans les sols tassés. À titre d'exemple, sur des sols forestiers acides, où l'activité des fuisseurs du sol (notamment des lombrics anéciques) est réduite, on constate une restauration de la structure du sol sous le seul effet de phénomènes physiques (humectation-dessiccation, gel-dégel) 4 à 5 ans après tassement, mais elle ne permet pas le retour aux conditions initiales de transferts des fluides (eau et gaz), de croissance des végétaux et d'activité biologique (Bottinelli *et al.*, 2014). De plus, la restauration naturelle de la structure du sol est plus rapide et efficace en surface qu'en profondeur où les variations de température, d'humidité et d'activité biologique sont plus limitées.

Le temps nécessaire après tassement pour revenir à un fonctionnement du sol non perturbé varie donc de quelques années à plusieurs dizaines d'années, en fonction du type de sol, du climat, de l'impact initial mais aussi des paramètres utilisés dans les études. Des expérimentations sont en cours pour explorer la restauration assistée par des solutions physiques, chimiques, voire biologiques. Un point est proposé ici sur l'état actuel des connaissances.

- *La restauration physique des sols*

Ce type de restauration, qui consiste à utiliser différentes techniques de travail du sol, conduit à des résultats mitigés malgré un coût élevé. La spécificité des sols forestiers (présence de souches et de rémanents, sols contenant beaucoup de racines pérennes et d'éléments grossiers, fréquence élevée de sols hydromorphes et très acides...) explique le succès modéré de ces pratiques.

Un travail mécanique par *cover crop* ou labour est trop superficiel pour restaurer la qualité physique de sols forestiers tassés. Ce type de travail ne permet pas de décompacter et de drainer complètement la couche affectée par le passage de l'engin et, de plus, les problèmes liés au tassement profond subsistent (mauvais enracinement, mauvais drainage...).

Un sous-solage profond représente une meilleure option, car il permet en général de décompacter l'ensemble de la couche de sol tassée. Cependant, il ne peut pas être appliqué dans tous les cas de figure. Un travail du sol localisé en potet travaillé (décompaction au profit du plant), sur des sols mal drainés (par exemple terrain plat et ne comportant pas ou peu d'éléments grossiers) va créer un « effet pot de fleur » négatif pour le peuplement. Il faudrait connecter les potets en évitant au maximum de perturber le sol (sous-solage efficace pour évacuer l'eau vers la pente). D'une manière générale, la remédiation mécanique du sol forestier doit éviter tout brassage intempestif, souvent négatif pour les fonctions du sol, y compris sa capacité à fixer le carbone.

Toute décision d'intervention doit être précédée d'un diagnostic de terrain pour déterminer les contraintes majeures, orienter vers un choix d'outils adaptés et maîtriser la mise en œuvre (état d'humidité du sol au moment des travaux...). Ciblé sur les plantations, les projets partenariaux Alter (MGVF, 2012) et Pilote (MGVF, 2013) s'intéressent à l'évaluation et au développement d'une gamme de solutions mécanisées pour la préparation du sol et la maîtrise de la végétation concurrente en alternative à l'emploi d'herbicides.

Dans le cas des cloisonnements, il est également parfois nécessaire d'intervenir pour remettre en état et améliorer la praticabilité de ceux-ci pour les exploitations ultérieures. Le nivellement à la lame est une pratique courante en cas d'orniérage important suite à une exploitation. Cependant, il s'agit d'un comblement des ornières qui conduit à un meilleur état visuel des cloisonnements mais pas d'une véritable restauration du sol. La capacité de drainage des cloisonnements reste déficiente, et les engins ne pourront souvent pas les emprunter car le sol sera trop humide et le restera une grande partie de l'année en comparaison de la partie non tassée de la parcelle.

- *La restauration chimique des sols*

Ce type de restauration consiste à apporter un amendement calco-magnésien à la surface du sol, pour tenter de dynamiser certaines propriétés ou activités biologiques qui permettraient d'accélérer la restauration (apport d'un cation flocculant, amélioration de l'activité de la macrofaune et développement racinaire...). Les résultats montrent que la stimulation de la restauration par les amendements calco-magnésiens est encore limitée sur le court terme (4-5 ans) mais significative pour certains indicateurs telle la croissance (INRA travail en cours). Des observations à plus long terme sont indispensables pour comprendre les mécanismes de la restructuration du sol par cette technique, qui concerne donc plutôt le moyen et le long terme.

- *La restauration biologique par les arbres*

Des travaux menés en Suisse sur des cloisonnements fortement orniérés dans des parcelles dévastées par la tempête de 1999 ont montré que l'Aulne glutineux pourrait être utilisé pour restaurer la qualité physique de sols tassés. Les aulnes ont, en effet, réussi à s'enraciner et à croître dans les ornières et on constate une amélioration nette des propriétés physiques (porosité, perméabilité à l'air) des sols jusqu'à 30 cm de profondeur 6-7 ans après la plantation. De plus, le développement d'un treillis végétal à partir de plantes qui coloniseraient rapidement le cloisonnement permettrait d'augmenter la portance du sol tout en donnant le cas échéant une biomasse récoltable entre les rotations.

Les cloisonnements d'exploitation : intérêts et limites

Les cloisonnements d'exploitation sont devenus une pratique courante, particulièrement en forêt publique. Des réticences concernant cette pratique ont été soulevées dans l'atelier avec notamment l'impression d'une nature totalement domestiquée ou encore la perte de surface productive. Un des objectifs des cloisonnements est de limiter le tassement des sols à l'échelle de la parcelle forestière, en limitant la circulation des engins à ces zones.

Si des préconisations d'implantation ont été formulées, de nombreuses questions subsistent autour de la praticabilité des cloisonnements (quand faut-il éviter de circuler sur les cloisonnements ? Est-ce à l'agent forestier ou à l'exploitant de prendre la décision ?...). Cette question est cruciale puisque la dégradation des cloisonnements peut conduire à de mauvaises pratiques de circulation en dehors de ces voies et nécessiter à terme la création de nouveaux cloisonnements, ce qui augmente d'autant la surface improductive. Une autre inquiétude soulevée concerne les impacts potentiels en bordure de cloisonnement, car si le tassement se limite au cloisonnement, l'hydromorphie peut se développer au-delà. Des recherches devront être menées dans les années futures pour améliorer nos connaissances dans ce domaine.

Des solutions permettant de limiter la dégradation des cloisonnements ont été évoquées lors de cet atelier, comme par exemple l'amélioration de la desserte qui permettrait de réduire les distances de débardage. Cependant, cette solution diminue la surface forestière productive et les coûts d'implantation d'un tel réseau doivent aussi être intégrés. D'autres solutions proposées consisteraient à exporter l'arbre entier hors du peuplement pour limiter les passages successifs d'engins ou encore

à déposer des branchages sur les cloisonnements pour en améliorer la portance. La première solution implique une exportation totale des rémanents et pose, dans bon nombre d'écosystèmes, un problème de gestion de la fertilité chimique du sol (Cacot *et al.*, 2006 ; Landmann *et al.*, ce numéro). La seconde solution est aujourd'hui largement mise en œuvre dans les chantiers d'abatage mécanisés de résineux. Cette technique permet de limiter la dégradation du cloisonnement mais concentre les éléments minéraux nutritifs contenus dans les branches fines et les feuillages sur la surface improductive de la parcelle.

La restauration naturelle est un processus lent, la restauration assistée est coûteuse (*cf.* paragraphes précédents), et, dans les deux cas de figure, l'ensemble des fonctions initiales du sol ne sera probablement pas restauré. Le problème peut néanmoins être abordé sous un autre angle, en ne traitant pas les conséquences mais en s'intéressant aux causes de la dégradation. Il est en effet intéressant de comparer le coût d'une restauration au coût d'une exploitation limitant le tassement des sols (par câble par exemple). Ce type d'exploitation entraîne un surcoût, mais s'il permet d'éviter une restauration coûteuse en comparaison d'une exploitation traditionnelle, l'action préventive prévaudra sur la curative.

Lorsqu'une dégradation est avérée, les règles régissant l'imputation du coût de la restauration ne sont souvent pas définies. L'exploitant doit-il assumer seul les coûts ? Des améliorations doivent encore être réalisées pour clarifier ce point et aboutir à des solutions efficaces. Il sera plus facile d'y parvenir en développant le dialogue, qu'en culpabilisant tel ou tel acteur.

Au vu des résultats mitigés de la restauration naturelle et assistée présentés ici, le mot d'ordre reste donc plus que jamais la prévention.

EXPORTATION ACCRUE DE BIOMASSE ET COMPENSATION PAR DES AMENDEMENTS MINÉRAUX

De nombreuses questions associées à la demande grandissante en bois énergie ont été abordées dans l'atelier. À plus ou moins long terme, les exportations de biomasse non compensées conduiront sur les sols à faible fertilité minérale à l'altération des fonctions des sols et des écosystèmes (production, diversité biologique, qualité des eaux). Les gestionnaires forestiers doivent aujourd'hui trouver le juste équilibre entre le niveau de récolte de la biomasse produite et le maintien de la fertilité. Pour cela, des outils d'aide à la décision existent, comme par exemple le Guide ADEME : *La récolte raisonnée des rémanents en forêt* (Cacot *et al.*, 2006), en cours de révision. Ce guide précise les possibilités et conditions d'exploitation accrue de biomasse selon la fertilité des sols, avec l'objectif du maintien de cette fertilité.

Lorsque la fertilité chimique de l'écosystème est fortement dégradée, le recours à l'amendement est une option permettant sa restauration et une amélioration globale du fonctionnement, et par conséquent des fonctions de l'écosystème. Cette pratique curative peut également être appliquée à des fins préventives pour maintenir un niveau de fertilité souhaité. En raison des besoins croissants en bois énergie, la question de l'apport raisonné d'amendements et de fertilisants se posera en plus plus fréquemment, mais elle ne se limite pas aux seuls cas de production de bois énergie.

Par ailleurs, l'utilisation accrue de bois énergie conduit à une production accrue de cendres, résidus de combustion, dont les caractéristiques chimiques sont celles d'un amendement minéral basique. La réintroduction de ces cendres (et de leur pouvoir neutralisant, fertilisant et amendant) en forêt pourrait en partie compenser les pertes (notamment en phosphore et en potassium) liées à une exploitation intense de biomasse, contrer l'acidification du sol et dynamiser l'activité biologique. La réglementation interdit pour l'heure cette pratique en forêt mais son intérêt (pratiques à l'étranger, acceptabilité sociale, devenir et impact des cendres sur l'écosystème...) mériterait d'être expertisé et

les conditions d'utilisation dans les forêts françaises déterminées (Deleuze *et al.*, 2012). Lors de ces ateliers, aucun débat n'a pu, faute de temps, avoir lieu concernant l'apport de cendres en forêt.

Les effets de l'amendement sont-ils bénéfiques et durables ?

La pratique de l'amendement consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium ou de magnésium, complété si besoin d'un apport de phosphore ou de potassium afin d'éviter des déséquilibres nutritionnels. Cette pratique vise au maintien ou à la restauration de la fertilité minérale d'un sol forestier et à une amélioration globale du fonctionnement de l'écosystème sur le long terme.

Les plus anciens essais d'amendement démontrent que la majeure partie des produits apportés est toujours présente et active dans le système sol-plante après 40 ans. L'amélioration globale constatée tient au fait que les cycles biogéochimiques sont très conservatifs ; les éléments sont activement recyclés par la végétation et les déperditions minimisées. Les effets avérés de l'amendement sont nombreux : amélioration de la fertilité chimique, physique et biologique des sols, de l'état sanitaire des peuplements, de leur résistance aux aléas climatiques, de la qualité physicochimique et biologique des eaux de surface, etc. (Renaud *et al.*, 2009). L'amendement à des fins de restauration permet le plus souvent le retour à une production « normale », point important dans la décision de recours à cette technique.

Dans le contexte actuel de demande de production accrue de bois énergie, il est bon de préciser que la remédiation chimique est indissociable d'une politique raisonnée d'exportation des rémanents en forêt. L'apport d'amendement sur sol pauvre chimiquement à des fins de restauration de la fertilité ne doit pas inciter à réaliser des surexploitations de biomasse.

Adapter les pratiques sylvicoles aux capacités de l'écosystème

Potentiellement, le gestionnaire peut intervenir sur de nombreuses variables pour permettre l'utilisation durable de la capacité à produire des écosystèmes forestiers. Mais en réalité, les pertes liées à l'exportation de biomasse constituent le terme le plus facilement modulable à courte échéance, du bilan de fertilité minérale (apports atmosphériques, apports par altération, pertes par drainage, pertes liées à l'exportation de biomasse). Quelques recommandations d'ordre général visant au maintien de la productivité et à la pérennité de l'écosystème ont été rappelées et discutées lors de l'atelier (Ranger *et al.*, 2011) :

- bien choisir l'essence : adapter au mieux l'essence à la station apporte une garantie pour optimiser durablement les fonctions de l'écosystème, mettant les peuplements à l'abri de bon nombre de contraintes ;
- gestion adaptée des coupes : pratiquer des transitions progressives entre les révolutions forestières et préserver au maximum une couverture végétale au sol (strate herbacée, régénération bien établie) pendant ces transitions ;
- récolter les arbres à un âge suffisamment avancé : les stades initiaux de la vie de peuplements pérennes sont les moins efficaces en termes d'utilisation des ressources minérales pour produire la biomasse (tissus jeunes dominants, recyclage interne à la plante limité, forte allocation des ressources vers le houppier...) ;
- raisonner la récolte et le traitement des rémanents (Cacot *et al.*, 2006) : les rémanents (branches, feuilles, aiguilles) sont des organes très riches en nutriments qui, exportés, constituent une perte pour l'écosystème ;
- répartir les rémanents issus d'une éclaircie ou d'une coupe de régénération de façon homogène sur l'ensemble de la parcelle, afin d'éviter de concentrer (comme le fait l'andainage par exemple) les éléments nutritifs retournant au sol sur des surfaces réduites. Éviter les décapages à

la lame qui entraînent une perte de fertilité importante si l'humus ou l'horizon A sont transférés dans l'andain. Le broyage des rémanents peut permettre de mieux répartir la fertilité mais leur incorporation au sol peut impacter ses fonctions (perturbation de la structure, de la porosité, de la diversité fonctionnelle...);

- raisonner la méthode de récolte pour limiter la dégradation physique des sols ;
- favoriser les mélanges gérables d'essences, de façon à maintenir une biodiversité fonctionnelle active dans l'écosystème. En raison des difficultés de gestion des peuplements mélangés (vitesse de croissance des essences très différente...), il sera préférable de se référer à des pratiques validées.

VALORISATION DES DÉCHETS (BOUES) ET DES FRICHES INDUSTRIELLES

Ces deux problématiques sont assez éloignées de la forêt mais sont intéressantes dans le cadre de la recherche de solutions pour produire plus de biomasse, soit *via* l'utilisation de fonciers abandonnés pour l'installation de systèmes agroforestiers, soit *via* l'utilisation des boues vues non plus comme un déchet mais une ressource de matières fertilisantes pour soutenir la production de biomasse avec des cultures ligneuses dédiées.

Valorisation des produits résiduels en cultures ligneuses intensives

Les épandages de boues sont réglementairement interdits en forêt et marginalement autorisés dans le cadre de projets de recherche et développement (Carnus et Charnet, 2003), alors que cette pratique est courante dans le cadre de plans d'épandage en milieu agricole (50 à 60 % des 1 million de tonnes équivalent MS/an de boues de station d'épuration produites en France). La question de la valorisation de ces boues pour les cultures ligneuses dédiées, avec des essences rejetant de souche type Salicacées des genres *Salix* et *Populus* pour l'essentiel, mais aussi Robinier et quelques autres selon le contexte, n'est pas nouvelle (expériences anciennes de l'AFOCEL, programme AILE du milieu des années 1990 : AILE, 2007 ; Charnet, 2006).

L'intérêt d'une telle pratique, dont l'expertise nationale est encore en grande partie cantonnée dans le Grand Ouest (surtout Bretagne), est patent quand on considère la montée des besoins en bois énergie liée au développement des grandes unités de chauffage collectif et le phénomène des déprises agricoles. Cette dernière évolution retire du système de production agricole les terres les moins fertiles, qui devront en général recevoir des apports en éléments fertilisants pour soutenir une production forte et régulière de cultures ligno-cellulosiques relativement exigeantes en éléments minéraux. Dans cette perspective, l'apport de produits résiduels apparaît comme une alternative à la fertilisation minérale, tant du point de vue économique (substitution à des fertilisants coûteux) que du point de vue de l'écologie globale (valorisation économique d'un déchet en conditions d'impact contrôlées). De tels apports doivent néanmoins être réalisés dans le respect des valeurs seuils quantitatives plafonnées réglementairement sur les éléments traces métalliques (ETM) et l'azote (en se référant désormais à la méthode du bilan azoté COMIFER).

Dans le contexte des sols forestiers, le projet ERESFOR initié en 1999 par le Comité national Boues et Forêts, avec un soutien financier de l'ADEME et du ministère de l'Agriculture, a permis la mise en place d'un réseau de 25 essais pour l'étude des effets d'apports de produits résiduels dans des plantations dédiées type TCR ou TTCR. Ce réseau, en veille depuis 2007, a permis d'identifier les problèmes techniques critiques liés à cette pratique, comme la variabilité des effets sur la croissance, le calcul de doses physiologiquement équilibrées et le calage des apports par rapport aux récoltes. Les principaux résultats obtenus ont été rappelés dans l'atelier, mais un suivi sur le plus long terme serait très intéressant.

D'autres travaux de recherche, comme le projet SYLVABIOM (programme Bioénergies 2008 de l'ANR), spécifiquement dédié aux cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques, devraient apporter de nouvelles réponses sur l'usage des boues dans les TCR ou les TTCR, mais le champ des questions encore ouvertes reste important.

Valorisation des friches industrielles par la production de biomasse

Les friches industrielles représentent un réservoir foncier important. Dans le cas où ces territoires ne sont pas voués à l'urbanisation ou à l'implantation de nouvelles industries, d'autres modes de valorisation peuvent être envisagés. La production de biomasse à usage industriel est une voie pour redonner de la valeur aux sols dégradés et développer une gamme de services écosystémiques à partir de sites délaissés. Le coût de la réhabilitation/dépollution serait alors assuré par le retour économique des projets industriels associés. Les friches industrielles constituent ainsi une source de compensation et l'installation d'un couvert forestier contribue à redonner de la valeur aux espaces dégradés. Les surfaces concernées sont importantes ; la seule Lorraine compte plus de 10 000 ha de friches industrielles, urbaines, minières, militaires ou ferroviaires. Certaines recèlent de fortes pollutions, à l'exemple des 354 anciens sites industriels lorrains, parmi les 5 500 sites pollués recensés en France (BASOL, 2013).

Sur les friches délaissées, la végétation peut se développer spontanément et conduire au développement d'écosystèmes remarquables tels que des pelouses métallicoles ou des écosystèmes forestiers. C'est le cas des bassins de décantation de la sidérurgie, composés à 100 % de matériaux technologiques qui génèrent des Technosols, où les métaux sont très faiblement biodisponibles et permettent l'installation et le développement d'un grand nombre d'espèces (Schwartz *et al.*, 2001). Sur le site de l'ancienne aciérie de Pompey (Meurthe-et-Moselle), on a recensé une centaine d'espèces dont 18 ligneuses (parmi lesquelles le Bouleau, le Chêne pédonculé et le Charme) et environ 70 herbacées.

Il est possible d'envisager d'utiliser ces sites pour produire de la biomasse à usage industriel. Il est alors nécessaire de lever une gamme de contraintes liées aux sols, dont les fonctions sont souvent très altérées (compaction, pH extrêmes, teneurs en sulfates en métaux lourds, voire en polluants organiques persistants). Ainsi, en complément de traitements visant à réduire les impacts des pollutions, il faut requalifier les fonctions des sols en faisant appel à des procédés de construction de sols utilisant des sous-produits urbains ou industriels (Séré *et al.*, 2010).

La faisabilité de filières de production de biomasse sur des friches industrielles est testée dans divers projets dont PHYTOPOP et LORVER. Ce dernier est destiné à restaurer les fonctions des sols et à créer de nouveaux agrosystèmes ou des écosystèmes agroforestiers sur friches industrielles délaissées offrant une productivité satisfaisante. Les plantes installées sont choisies pour leur intérêt énergétique (par exemple le Peuplier), la production de fibres (chanvre, ortie, etc.) et l'extraction des métaux (par exemple à l'aide de plantes hyperaccumulatrices). De plus, leur présence contribue à la transformation des polluants et à la réduction des impacts associés à la contamination des sols.

La nécessaire préservation de la ressource en sols amène ainsi à considérer l'ensemble des territoires disponibles. Dans ce contexte, les friches industrielles constituent une nouvelle source de services écosystémiques. Les choix de création de nouveaux écosystèmes et de gestion de ces territoires requièrent cependant des connaissances nouvelles sur le fonctionnement de ces écosystèmes agroforestiers spécifiques (écologie, écotoxicologie, évolution des pollutions...) et une ingénierie pédologique adaptée pour l'exploitation de la ressource.

Le concept de multifonctionnalité des forêts est-il à un tournant ?

La gestion forestière s'inscrit dans le cadre de la gestion multifonctionnelle des forêts, pilier de la politique forestière française. Les forêts ont pour vocation de répondre aux principales fonctions assignées par la société : la production ligneuse (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois énergie), la protection des fonctions écologiques (protection de la biodiversité, qualité des paysages), des fonctions environnementales (qualité des eaux et de l'air), des fonctions sociales et culturelles, et la prévention contre les risques naturels.

Dans le contexte actuel de demande accrue de production de bois énergie, le concept de multifonctionnalité tel que décrit ci-dessus est peut-être à un tournant. Il convient d'adapter la production et l'exportation de biomasse aux capacités des écosystèmes pour gérer durablement les forêts. Si cette capacité est dépassée, de nombreuses fonctions peuvent alors être mises en danger. Comme mentionné précédemment, le recours à l'amendement est une alternative possible permettant de maintenir un niveau de fertilité et de productivité souhaité mais il faut veiller néanmoins au maintien des trois autres fonctions. Compte tenu d'une certaine antinomie entre la fonction de conservation et celle de production, la question de la spécialisation des écosystèmes forestiers a été soulevée lors de l'atelier. Ce débat n'est pas à proprement nouveau ; il avait notamment été initié à l'occasion des différentes crises énergétiques.

Faut-il alors envisager de concentrer la production soutenue de biomasse sur des écosystèmes forestiers dédiés à la production de bois (ou de fibre) et qui ne rempliraient plus intégralement les fonctions décrites précédemment ? Ces forêts permettraient-elles de faciliter la réelle multifonctionnalité des forêts à valeur patrimoniale élevée ? Dans cette réflexion, la multifonctionnalité doit se raisonner à différentes échelles et intégrer divers facteurs de la durabilité : besoins en bois éco-matériau, qualité des sols et des eaux, gestion des déchets, etc. La valorisation des produits résiduels et l'utilisation des friches industrielles pour produire de la biomasse doivent aussi être intégrées à la réflexion.

**Arnaud LEGOUT – Grégory VAN DER HEIJDEN –
Jacques RANGER**
INRA Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
F-54280 CHAMPENOUX
(legout@nancy.inra.fr)
(ranger@nancy.inra.fr)
(gregory.vanderheijden@nancy.inra.fr)

Claudine RICHTER
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche et Développement
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(claudine.richter@onf.fr)

Noémie POUSSE
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche et Développement
Pôle Recherche et Développement de Nancy
11 rue de l'Île-de-Corse
F-54000 NANCY
(noemie.pousse@onf.fr)

Jean-Louis MOREL
Université de Lorraine/INRA
GISFI – UMR 1120 Laboratoire Sols et Environnement
2 avenue de la Forêt de Haye – TSA 40602
F-54518 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY CEDEX
(Jean-Louis.Morel@univ-lorraine.fr)

François CHARNET
CNPFF-IDF
Antenne d'Orléans
13 avenue des Droits de l'Homme
F-45921 ORLÉANS CEDEX 9
(francois.charnet@cnpff.fr)

Marie-Odile SIMONNOT
Université de Lorraine/CNRS
GISFI – UMR 7274
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
ENSIC
1 rue Grandville – BP 20451
F-54001 NANCY CEDEX
(marie-odile.simonnot@univ-lorraine.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- AILE. — Le Taillis à très courtes rotations de Saule : de la production d'énergie renouvelable à la valorisation d'effluents prétraités. Programme LIFE-Environnement WilWater 2004-2007. — Rennes : AILE, 2007. — 4 p.
- AUGRIS (S.). — Des chantiers tests ONF pour trouver les outils de récolte adaptés aux petits bois. — *Le Journal de la Mécanisation forestière*, janvier-février 2012, pp. 27-29.
- Basol, 2013. [En ligne] : <http://basol.developpement-durable.gouv.fr>
- BÉNARD (V.). — Profor©, logiciel d'estimation de la praticabilité des cloisonnements : premiers essais en Haute-Marne. — *Rendez-vous Techniques*, n° 23-24, printemps 2009, pp. 14-23.
- BOTTINELLI (N.), HALLAIRE (V.), GOUTAL (N.), BONNAUD (P.), RANGER (J.). — Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effects and short term recovery. — *Geoderma*, n° 217-218, 2014, pp. 10-47.
- CACOT (E.), EISNER (N.), CHARNET (F.), LÉON (P.), RANTIER (C.), RANGER (J.). — La Récolte raisonnée des rémanents en forêt. — Angers : ADEME Éditions, 2006. — 36 p.
- CAPOWIEZ (Y.), CADOUX (S.), BOUCHAND (P.), ROGER-ESTRADE (J.), RICHARD (G.), BOIZARD (H.). — Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration on field observations and results from a semi-field experiment. — *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 2009, pp. 711-717.
- CARNUS (J.-M.), CHARNET (F.). — Des boues en forêt ? — *Forêt-Entreprise*, n° 150, 2003, pp. 55-60.
- CHARNET (F.). — Valorisation des boues biologiques en taillis à très courtes rotations de Saule. Expérimentation sur la commune de Pleyber-Christ (Finistère). Convention ADEME. — Orléans : IDF, 2006. — 35 p.
- DELEUZE (C.), MICHENEAU (C.), RICHTER (C.), BOULANGER (V.), GARDETTE (Y.-M.), BRÊTHES (A.), GIBAUD (G.), AUGUSTO (L.), DUPONT (C.), GAUTRY (J.-Y.), FRAYSSE (J.-Y.), RANTIER (C.). — Le Retour des cendres de bois en forêt : opportunités et limites. — *Rendez-Vous Techniques*, n° 35, hiver 2012, pp. 16-28.
- GOUTAL (N.). — Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. — Nancy : AgroParisTech, 2012. — 223 p. (Thèse) [En ligne] : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00737884>.
- MATTHIES (D.), ZIESAK (M.), KREMER (J.). — Le logiciel Profor©, un outil de prévention pour juger de la praticabilité des sols lors de l'exploitation forestière. — *Rendez-Vous Techniques*, n° 14, automne 2006, pp. 3-8.
- MGVF. — [En ligne] : <http://www6.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret/Projets-en-cours/projet-ALTER>. — 2012.
- MGVF. — [En ligne] : <http://www6.nancy.inra.fr/mission-gestion-vegetation-foret/Projets-en-cours/projet-PILOTE>. — 2013.
- PISCHEDDA (D.). — Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL » — Guide pratique. — FCBA, ONF, 2009. — 110 p.
- RANGER (J.), AUGUSTO (L.), BERTHELOT (A.), BOUCHON (J.), CACOT (E.), DAMBRINE (E.), GAVALAND (A.), LACLAU (J.-P.), LEGOUT (A.), NICOLAS (M.), NYS (C.), PONETTE (Q.), OTTORINI (J.-M.), SAINT-ANDRÉ (L.). — Sylviculture et protection des sols. — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 2, 2011, pp. 245-264.
- RENAUD (J.-P.), PICARD (J.-F.), RICHTER (C.), LEGOUT (A.), NYS (C.). — Amendements calco-magnésiens et fonctionnement écologique : bilan des expériences conduites dans l'Est de la France (Massif vosgien et Ardennes). — *Revue forestière française*, vol. LXI, n° 3 spécial "Amendements des sols forestiers", 2009, pp. 283-300.
- SCHWARTZ (C.), FLORENTIN (L.), CHARPENTIER (D.), MUZIKA (S.), MOREL (J.-L.). — Le Pédologue en milieux industriels et urbains. I. Sols d'une friche industrielle. — *Étude et Gestion des Sols*, 8, 2001, pp. 135-148.
- SÉRÉ (G.), SCHWARTZ (C.), OUVRARD (S.), RENAT (J.-C.), WATTEAU (F.), VILLEMIN (G.), MOREL (J.-L.). — Early pedogenic evolution of constructed Technosols. — *Journal of Soils and Sediments*, 10, 2010, pp. 1246-1254.

COMPENSATION DES EXPORTATIONS MINÉRALES ET REMÉDIATIONS AUX DÉGRADATIONS DES SOLS. Compte rendu de l'atelier 3 [Résumé]

Les forêts françaises font face aujourd'hui à des pressions extérieures croissantes. Ces contraintes sont d'ordre nutritionnel ou sylvicole ou climatique et risquent d'impacter la durabilité des écosystèmes forestiers. Le sol peut être impacté, entraînant une dégradation de ses composantes chimique ou physique ou biologique. L'objectif de l'atelier était d'apporter des éléments de connaissance et de débat autour des différents types de dégradation, de remédiation et de restauration des sols. Cet atelier a également permis d'échanger autour de différentes approches permettant de soutenir la productivité forestière, par l'utilisation d'intrants de différentes natures (amendements/cendres, boues de stations d'épuration...) ou par l'utilisation des friches industrielles pour produire de la biomasse.

COMPENSATING FOR THE EXPORT OF NUTRIENTS AND RESTORATION OF DEGRADED SOILS. Report of the workshop 3 [Abstract]

French forests are currently under increasing pressure from nutritional, forest management and climatic factors that may affect the sustainability of forest ecosystems and degrade the chemical, physical and biological components of the soil. This workshop presented the current state of knowledge and discussed how soils may be degraded and how soil degradation may be remediated and restored. It also provided an opportunity for discussing various approaches to ensure sustainable forest production by using different types of input (liming/ash, sludge, etc.) or by producing biomass on industrial wastelands.
