

UNE APPROCHE MULTIACTEUR ET MULTIDISCIPLINAIRE POUR INNOVER DANS LES PRATIQUES DE PLANTATION FORESTIÈRE

CATHERINE COLLET – CLAUDINE RICHTER – ERWIN ULRICH – MARIEKE BLONDET –
CHRISTINE DELEUZE – VINCENT BOULANGER – MATHIEU DASSOT – MYRIAM LEGAY

NDLR : La première version de cet article est parue dans Innovations agronomiques, 56, 2016. Nous remercions la rédaction de Innovations Agronomiques de nous avoir autorisés à en publier une deuxième version dans la Revue forestière française.

CONTEXTE : ENJEUX DE LA PLANTATION FORESTIÈRE

Le renouvellement des forêts est l'une des clés de la gestion durable des forêts, permettant d'assurer la pérennité des peuplements forestiers récoltés, et, par là-même, l'ensemble des services associés à la forêt. Le taux de renouvellement des forêts constitue un indicateur indirect du dynamisme de la gestion forestière dans sa dimension productive, puisqu'il est mécaniquement lié aux opérations de récolte et donc à l'alimentation de la filière bois, et dans sa dimension prospective, par l'opportunité de mieux adapter les peuplements aux conditions futures, qu'elles soient climatiques ou économiques.

Le mode de renouvellement se partage entre la régénération naturelle et la plantation. Actuellement, on régénère en France entre 30 000 et 40 000 ha de forêts par plantation chaque année (Agreste, 2013), mais cette surface est en forte baisse depuis plus de 20 ans. Ce constat a fait l'objet d'une interpellation des pouvoirs publics par la forêt privée française et par les professionnels de la filière (Bouvarel, 2012 ; Naudet, 2012). Dans la double perspective du changement climatique et des évolutions des demandes de la filière bois, la nécessité de faire évoluer la composition des peuplements forestiers pour s'adapter simultanément à ces deux évolutions, rend ce constat plus préoccupant. La faiblesse de l'ensemble de l'activité de plantation, de la décision de renouvellement du peuplement à la reprise des plants, et de la filière économique associée, pourrait ainsi être un facteur limitant les capacités d'adaptation de la forêt française.

Parmi les principales explications à ce déficit de renouvellement des dernières décennies, citons le morcellement de la forêt privée qui constitue un frein à sa gestion, une faible motivation économique liée aux faibles cours du bois, les crises liées aux tempêtes et, dans les zones fréquentées par le public, une pression pour limiter les coupes.

Dans le cadre de la gestion courante, ce sont surtout les échecs et les limitations techniques qui retiennent les forestiers d'engager des travaux de plantation. Les dégâts aux plantations par des populations d'ongulés, les crises sanitaires émergentes (hanneton, chenilles processionnaires), les

sécheresses estivales récurrentes sont autant de facteurs d'échec qui sont en augmentation depuis quelques décennies. Face à ces échecs récurrents, constatés par le ministère en charge des forêts (Goudet, 2010), il est actuellement déterminant de proposer aux praticiens des innovations dans les méthodes sylvicoles qui permettent d'assurer le succès des plantations.

Pour finir, alors que la compétence technique des intervenants devient un point crucial pour répondre à toutes ces difficultés, on observe une perte de références des forestiers face aux facteurs clés de réussite des plantations dans de nombreuses régions (Rosa, 2014). Outre l'innovation technique, il est donc primordial de regagner en compétence, pour que les innovations produites puissent *in fine* apporter les effets escomptés.

Cette présentation comporte deux parties : une analyse du processus d'innovation en sylviculture et des leviers à actionner pour favoriser l'innovation dans la pratique de la plantation et une analyse des besoins en innovation technique dans les pratiques de plantation, et des exemples d'innovations produites pour répondre à ces besoins.

PROMOVOIR L'INNOVATION DANS LES MÉTHODES DE PLANTATION

L'innovation technologique dans les pratiques sylvicoles

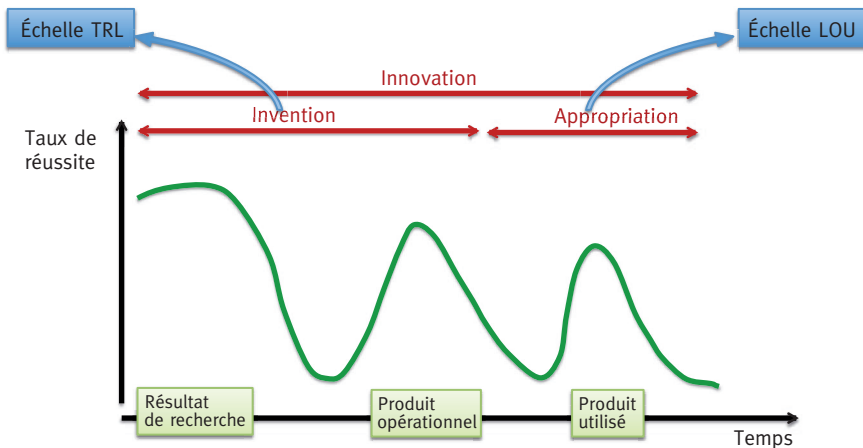
La sylviculture, comme toute pratique, fait l'objet d'innovations régulières (Bouriaud *et al.*, 2011). En Europe, les études sur l'innovation dans le secteur forêt-bois sont récentes et portent, pour l'essentiel, sur les industries de transformation du bois (Hansen, 2010), l'adaptation des forêts au changement climatique (Lawrence, 2016) et la fourniture de services écosystémiques par les forêts (Slee, 2011). En revanche, l'innovation dans les pratiques des différents acteurs intervenant en forêt (entreprises de travaux forestiers, propriétaires, gestionnaires) a rarement été abordée (Rametsteiner et Weiss, 2006 ; Bouriaud *et al.*, 2011 ; Nybakk *et al.*, 2015).

Selon la définition donnée par le *Manuel d'Oslo* (OECD, 2005), une innovation technologique est la mise en œuvre d'un produit ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, dans les pratiques de l'organisation concernée. Cette définition met en avant une caractéristique importante d'une innovation, sa mise en œuvre. Il faut ainsi distinguer l'invention, qui correspond à la création d'une nouveauté technique, de l'innovation qui fait référence au processus de transfert et d'adoption de cette innovation par les praticiens. En d'autres termes, l'innovation implique l'acceptation et l'implantation effective et durable de cette nouveauté dans un milieu social particulier (Alter, 2010 ; Gaglio, 2011) (figure 1, p. 535).

L'adoption d'un produit par les acteurs d'un groupe social dépend d'un ensemble de facteurs liés aux caractéristiques intrinsèques du produit ou à l'environnement socioéconomique dans lequel est introduit ce produit (Rogers, 1995). Parmi ces nombreux facteurs, on peut noter la perception par les utilisateurs des caractéristiques du produit qui, pour un même produit, peut être très variable selon les personnes ; l'attitude des acteurs face à l'apprentissage et la formation nécessaire à l'adoption ; l'existence de réseaux sociotechniques auxquels les acteurs concernés adhèrent (Wisdom *et al.*, 2014). Plusieurs études ont évalué l'importance de ces différents facteurs jouant sur la capacité des acteurs du secteur forestier à innover sans pour autant distinguer les différentes phases du processus d'innovation, notamment les phases d'invention et d'implantation. Les premiers facteurs à ressortir sont l'attitude face à l'apprentissage ainsi que l'insertion dans des réseaux sociotechniques ou, plus largement, dans des systèmes d'innovation (Rametsteiner et Weiss, 2004 ; Nybakk *et al.*, 2009).

FIGURE 1 PROCESSUS D'INNOVATION : ÉVOLUTION DU TAUX DE SUCCÈS DANS LE TEMPS, PRODUITS SUCCESSIFS (résultat de recherche, produit opérationnel, produit utilisé par les utilisateurs finaux) ET ÉTAPES CORRESPONDANTES (invention et appropriation)

L'avancement du processus lors de l'étape d'invention peut être estimé à partir d'une échelle de type TRL (*Technology Readiness Level*, NASA), et l'avancement lors de l'étape d'appropriation peut être estimé à partir d'une échelle de type LOU (*Level Of Use*, Hall 2006)



Le système d'innovation, au sein d'un domaine délimité, se définit par les acteurs qui le composent et les relations de différente nature (informations, fonds, services) qui les unissent (Edquist, 1997). C'est un concept relativement récent qui porte en exergue les interrelations entre acteurs et qui met clairement en avant la nature non linéaire et pluridirectionnelle du processus d'innovation. Il ouvre ainsi sur une approche systémique de l'étude du processus d'innovation. Dans la filière forêt-bois, des systèmes d'innovation ont été définis (sectoriels, régionaux ou nationaux) qui s'imbriquent entre eux. L'analyse des systèmes forestiers met en évidence plusieurs faiblesses : le caractère incomplet des systèmes d'innovation, la pauvreté des interactions entre les acteurs de ces systèmes, l'insuffisance des interactions avec des systèmes d'innovation voisins (Kubeczko *et al.*, 2006 ; Rametsteiner et Weiss, 2006 ; Petenella et Maso, 2011 ; Weiss, 2011a). Enfin, on peut noter que la place de la formation – initiale et continue – est peu abordée dans ces études portant sur le secteur forestier, bien que les acteurs de la formation soient toujours identifiés comme parties prenantes des systèmes d'innovation.

Freins et leviers à l'invention de nouvelles pratiques de plantation

Dans le domaine des outils et méthodes de plantation, l'innovation est principalement portée par des praticiens, parfois accompagnés par des organismes de recherche et développement. Les praticiens qui réalisent les travaux de plantation sont, pour la plupart, des petites et moyennes entreprises (Sterbova *et al.*, 2016). Ces entreprises du monde forestier, classées comme traditionnelles et de faible technologie, sont souvent considérées comme peu productrices d'inventions (Weiss, 2011b). En réalité, la palette des outils et méthodes utilisés par les entreprises en France comporte un nombre important d'outils et méthodes conçus et développés par ces entreprises pour leur propre utilisation.

Pour autant, la question des méthodes et des politiques à mettre en œuvre pour favoriser l'invention par les entreprises, et qui prennent en compte les spécificités du domaine forestier, est pour l'instant encore peu abordée (Drolet et Lebel, 2010 ; Sterbova *et al.*, 2016).

Freins et leviers à l'appropriation des nouvelles pratiques par les acteurs

Les praticiens concernés par la plantation sont principalement les prescripteurs de travaux (propriétaires et gestionnaires forestiers) et les opérateurs (entreprises de travaux forestiers, ouvriers des coopératives et de l'ONF). L'analyse du processus d'appropriation des nouveaux outils disponibles doit prendre en considération tous ces différents groupes ainsi que leurs interrelations.

L'appropriation d'une invention par un individu dépend de différents facteurs : la publicité faite autour de l'outil et la connaissance qu'en a le praticien ; l'attitude et la motivation du praticien vis-à-vis de l'innovation ; l'évaluation de l'outil par le praticien, qui se base sur une analyse des avantages que l'outil peut procurer en termes de compétitivité pour l'entreprise ou de qualité de travail effectué, et sur une analyse des risques, notamment économiques, encourus lors de l'investissement dans le nouvel outil (Akrich *et al.*, 1988 ; Sterbova *et al.*, 2016). L'importance et la signification de chaque facteur varient fortement entre les différents groupes d'acteurs.

Une étude réalisée en Haute-Normandie (Petit, 2016) portant sur les freins à l'adoption de nouvelles méthodes de plantation par différents acteurs du secteur régional a mis en évidence :

- pour l'ensemble des acteurs, une attitude globalement ouverte vis-à-vis de l'innovation technologique, que les acteurs parviennent à concilier avec leurs valeurs et leurs pratiques ;
- pour l'ensemble des acteurs, une faiblesse des réseaux sociotechniques locaux qui mène à une mauvaise circulation de l'information, et à l'absence de vision partagée et d'objectifs communs entre les différents acteurs locaux ;
- pour les entreprises de travaux forestiers, plus particulièrement, une réticence à l'investissement dans du nouveau matériel, dans un contexte économique perçu comme très incertain.

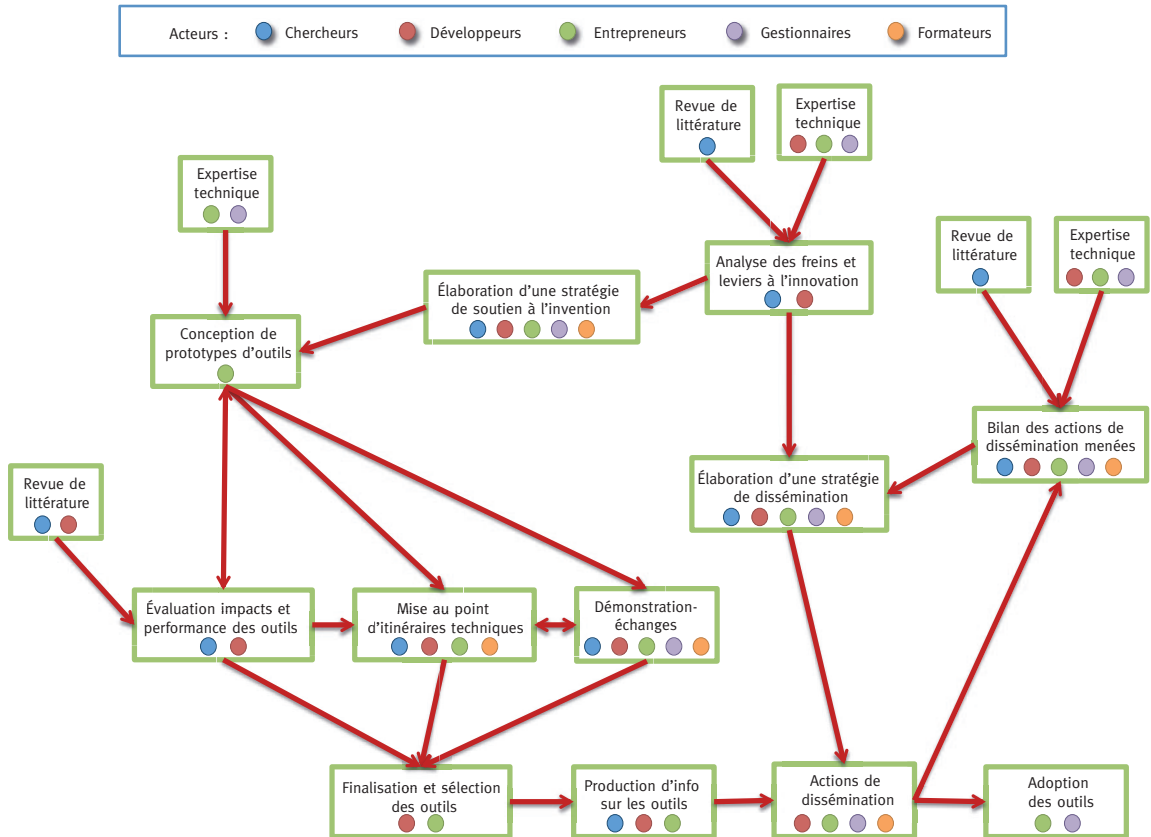
Ces observations suggèrent qu'un des principaux leviers possibles serait une meilleure mise en réseau des acteurs locaux, à travers différents liens fonctionnels : partage d'information, échanges de services, construction de partenariats économiques. Les objectifs de ce type de réseau sont de construire une vision cohérente commune aux différents acteurs, d'assurer une bonne diffusion de l'information et un partage des connaissances, et de mettre en place des mécanismes de répartition des risques entre acteurs.

Mise en place d'un réseau d'acteurs pour innover dans les méthodes de plantation

Pour favoriser l'innovation dans les outils et méthodes de plantation, nous avons choisi de constituer un réseau sociotechnique qui soit animé par le partage de connaissances. Ce réseau est défini à une échelle nationale et peut se décliner à des échelles plus locales dans certaines régions. Il comporte principalement des chercheurs, des développeurs, des propriétaires, des gestionnaires forestiers, des entrepreneurs et des opérateurs de travaux forestiers. Les liens entre acteurs sur lesquels s'appuie le réseau mis en place sont les échanges d'informations et connaissances (comprenant la formation). Ils se superposent à d'autres liens existant entre acteurs, comme la collaboration économique ou les échanges de services, mais qui ne sont pas pris en compte dans le réseau mis en place dans le cadre de ce travail. La figure 2 (p. 537) indique l'apport des acteurs à chaque phase du processus d'innovation que nous souhaitons promouvoir à travers ce réseau.

FIGURE 2

DÉMARCHE MISE EN ŒUVRE POUR INNOVER DANS LES PRATIQUES DE PLANTATION FORESTIÈRE
 Les différents acteurs impliqués à chaque étape de la démarche sont indiqués.



DÉVELOPPER DES MÉTHODES DE PLANTATION INNOVANTES

Performances des méthodes de plantation

La plantation forestière comporte des étapes successives : une première étape hors forêt, la production des plants, et trois étapes en forêt, la préparation mécanique du site (PMS), la plantation proprement dite, et les entretiens après plantation. Dans cette étude, nous nous focalisons sur les étapes qui se déroulent en forêt.

• *Préparation mécanique du site*

La préparation mécanique du site (PMS) avant plantation consiste en un travail réalisé à l'aide de machines préalablement à la mise en place des plants. La PMS est utilisée pour réduire certaines contraintes à la survie et la croissance des plants, liées aux caractéristiques du sol (compaction, engorgement, sécheresse) ou de la végétation spontanée (végétation fortement compétitive).

Il existe une grande variété d'outils de PMS (von der Gönna, 1992). Chaque outil a été conçu pour lever un jeu de contraintes spécifiques, et se révèle souvent peu efficace quand il est utilisé dans un autre contexte. Dans le passé, il n'existait pas d'outil de PMS pour assurer le succès des plantations dans certains contextes stationnels réputés difficiles mais néanmoins rencontrés sur des superficies importantes en Europe de l'Ouest (par exemple : station hydromorphe à Molinie, station mésotrophe à Fougère aigle). Les développements des dernières années ont commencé à combler ce manque, en commençant par les situations de blocage les plus urgentes.

La perturbation du sol et la perturbation de la végétation spontanée constituent les deux impacts environnementaux directs de la PMS, qui peuvent à leur tour altérer la biodiversité (Espelta *et al.*, 2003), accroître les émissions de gaz à effet de serre (Tyree *et al.*, 2006) ou augmenter les risques d'érosion des sols (Carling *et al.*, 2001). Les impacts à long terme de la modification de la structure des horizons supérieurs du sol sont encore mal connus (Kranabetter *et al.*, 2006).

Le passage de l'outil de PMS dans la parcelle a des impacts primaires qui correspondent aux effets attendus de l'outil sur le sol et la végétation, ainsi que des impacts secondaires qui correspondent aux effets causés par le porte-outil (Kees, 2008), généralement non désirés (compaction, orniérage). En règle générale, les effets primaires doivent être limités au minimum nécessaire pour assurer le succès de la plantation. Disposer d'outils de PMS parfaitement adaptés aux contraintes du site est une clé pour contrôler l'ampleur des impacts primaires. Les effets secondaires doivent toujours être réduits au minimum. Le choix de porte-outils légers, munis de pneumatiques adaptés ou de chenilles, permet généralement de réduire les impacts secondaires sur le sol (Jansson et Johansson, 1998).

Une première voie pour diminuer à la fois les impacts primaires et secondaires est de limiter la surface réellement travaillée avec les outils, en réalisant une PMS intermittente au lieu d'une PMS en plein sur la parcelle (Löf *et al.*, 2012). La PMS intermittente laisse des zones intactes entre les zones préparées pour la plantation, plus ou moins larges selon la méthode employée. Les zones préparées peuvent prendre la forme de placeaux, de bandes ou de petits potets.

Une deuxième voie pour diminuer les impacts des interventions est de limiter le nombre d'interventions réalisées sur le site, en combinant en un nombre réduit d'opérations les différentes interventions prévues de façon successive. Combiner ainsi différents outils de PMS sur un même tracteur permet de n'effectuer qu'un seul passage et de réduire l'impact secondaire dû au porte-outil.

Les coûts associés aux méthodes de PMS comprennent les coûts directs de mise en œuvre de l'outil de PMS, ainsi que les coûts indirects liés aux opérations sylvicoles effectuées au cours des premières années qui suivent la PMS (plantation, regarnis, dégagements). La PMS facilite la mise en place des plants par les planteurs et leur reprise après plantation, et réduit donc les coûts associés à la plantation (Granhus et Fjeld, 2008) et aux éventuelles opérations de regarnissage. L'impact de la PMS sur les opérations de dégagement est plus complexe et dépend de la dynamique de la végétation après PMS. Si la méthode est bien choisie, la PMS va réduire le développement de la végétation spontanée et donc le nombre d'opérations de dégagement à prévoir. À l'inverse, le choix d'une méthode inappropriée peut conduire à une accélération du développement de la végétation et finalement à une augmentation du coût des opérations de dégagement (Uotila *et al.*, 2010).

Les coûts directs et indirects associés à la PMS sont souvent du même ordre de grandeur, et l'estimation du coût total de la PMS doit prendre en compte l'itinéraire sylvicole complet dans lequel s'insère la méthode de PMS. Cet itinéraire doit être défini sur plusieurs années, jusqu'à l'acquisition de la plantation.

- *Plantation*

En France, la majorité des plantations forestières sont réalisées manuellement. La plantation manuelle est une opération dure sur le plan physique pour les ouvriers qui la réalisent et coûteuse pour le gestionnaire de la forêt. C'est également une opération délicate, dont la qualité de la réalisation, qui se révèle parfois très variable selon les opérateurs, est difficile à estimer *a posteriori*. La mécanisation de la plantation est une voie explorée depuis de nombreuses années pour dépasser ces différentes limites : réduire la pénibilité du travail, réduire le coût de plantation, et standardiser la qualité du travail réalisé (Ulrich, 2014).

La plantation mécanisée rencontre plusieurs difficultés. Une première difficulté est que les machines à planter doivent accepter différents types de plant, en godet ou à racines nues, et de différentes tailles, et doivent dans la mesure du possible effectuer les différentes opérations successives (pralinage et habillage des racines avant plantation dans le cas de plants à racines nues, pose de protections éventuelles contre le gibier). La plantation mécanique est également plus exigeante quant à l'état de la parcelle (présence de rémanents et de souches) que des planteurs manuels.

La plantation mécanique se positionne le plus souvent dans une chaîne d'interventions mécaniques, après le nettoyage de la parcelle et la PMS. La combinaison de plusieurs de ces opérations en une seule intervention à l'aide de machines qui peuvent déblayer les rémanents, effectuer une PMS localisée et installer les plants en un seul passage est une option qui devrait permettre de réduire les impacts environnementaux et les coûts associés. Le développement de machines qui pourraient réaliser successivement ces différents travaux sans sacrifier la qualité du travail est une attente forte des gestionnaires.

- *Entretiens*

Dans les années qui suivent la plantation, des dégagements réguliers sont effectués pour contrôler le développement de la végétation accompagnatrice qui entre en compétition avec les jeunes plants. Ces entretiens sont en grande partie effectués de façon manuelle. Tout comme pour la plantation manuelle, ce sont des opérations difficiles pour les ouvriers et coûteuses pour les gestionnaires.

La pénibilité (manutention, postures difficiles, vibrations mécaniques, travail répétitif) et la dangerosité (risque élevé d'accidents) du travail manuel en forêt ont été soulignées de longue date (BIT, 1998), et la mise en place de stratégies de réduction des risques encourus par les opérateurs est une nécessité toujours présente (Stjernberg et Kinney, 2007; Lornet et Previtali, 2009).

Une première voie pour limiter les entretiens a déjà été présentée plus haut. Il s'agit d'effectuer une PMS qui permette de réduire de façon durable (3 à 5 ans) le développement de la végétation et qui réduise donc la nécessité d'intervenir en entretien pour assurer le succès de la plantation. La mécanisation des opérations de dégagement est une deuxième voie actuellement explorée.

Élargir la gamme des outils mécaniques pour améliorer les pratiques de plantation

Les attentes vis-à-vis de l'innovation technique pour réaliser la chaîne des travaux de plantation recouvrent des besoins de différentes natures :

- Amélioration des performances techniques des méthodes employées, pour assurer le succès des plantations, notamment dans des conditions difficiles.
- Réduction des coûts totaux de plantation.
- Réduction des impacts environnementaux des interventions pratiquées.
- Amélioration des conditions de travail des opérateurs : réduction de la pénibilité du travail et amélioration des conditions de sécurité.

Le recours aux méthodes mécaniques pour effectuer la plantation forestière est pratiqué depuis plusieurs décennies. Néanmoins, la gamme des outils actuellement disponibles ne permet pas de répondre aux différentes attentes exprimées. Un élargissement de la gamme, comprenant l'introduction de nouveaux types d'outils, est nécessaire.

Cette partie présente des exemples d'innovations récentes qui ont permis des améliorations significatives des travaux de plantation.

- *Améliorer les performances techniques*

Certains contextes stationnels rencontrés sur de larges surfaces en France et en Europe sont très contraignants pour les jeunes plants, et les plantations qui y sont réalisées présentent de forts taux d'échec. Les outils mécaniques traditionnels ne sont généralement pas en mesure de lever les contraintes au développement des plants.

Les sols fortement compactés constituent un obstacle à l'installation des plants (Kees, 2008). Cette compaction peut être d'origine naturelle ou résulter d'une mauvaise gestion des sols et notamment de passages d'engins lourds sur des sols sensibles. La PMS peut être utilisée pour restaurer les sols tassés (Goutal, 2012) et faciliter la plantation ultérieure. La bident Maillard (Société Maillard, Montdoré, France) est un outil conçu pour décompacter les sols en profondeur. L'outil est monté sur une pelle mécanique de 22 tonnes (figure 3, p. 541), qui assure la puissance nécessaire pour fracturer le sol en profondeur, même dans des sols très tassés. La décompaction est assurée jusqu'à 70 cm et peut, dans le meilleur des cas, atteindre 80-90 cm, des profondeurs bien supérieures à celle atteinte par la grande majorité des outils de PMS (généralement inférieure à 30 cm).

La Fougère aigle est une espèce très compétitive, qui menace fortement la survie des jeunes arbres qu'elle avoisine (Balandier *et al.*, 2006). Le contrôle de la fougère n'est pas aisé. La fougère met en place un réseau de rhizomes dense et souvent très profond à partir duquel se développent les nouvelles frondes de fougère. Il est donc nécessaire de détruire ce réseau de rhizomes si on veut contrôler la fougère durablement. Le Scarificateur Réversible® (Grenier-Franco, Andancette, France) est un outil monté sur minipelle (figure 3, p. 541) qui fracture la structure du sol et extrait des systèmes racinaires jusqu'à 50 cm de profondeur. Il permet de contrôler efficacement la Fougère aigle pendant 3 à 4 années et permet ainsi d'améliorer significativement la survie et la croissance des plants par rapport à des outils de PMS plus classiques (Collet *et al.*, 2015).

- *Réduire les coûts associés*

L'amélioration des performances techniques des méthodes est une première voie pour la réduction des coûts de plantation notamment dans les contextes stationnels contraignants pour les plants car, en assurant le succès de la plantation, elle permet d'éviter les coûts associés à une deuxième opération de PMS et de plantation sur le site, qui s'avère nécessaire en cas d'échec.

Dans le cas de la PMS, l'amélioration des performances techniques peut également permettre de réduire les coûts associés aux entretiens ultérieurs. Ainsi, le Scarificateur Réversible®, monté sur minipelle, employé pour dégager la fougère dans des stations sur sols limono-sableux permet d'éviter jusqu'à 4 opérations de dégagement dans les années qui suivent la plantation. Les coûts directs de mise en œuvre de cet outil sont très supérieurs à ceux des outils tractés. Néanmoins, le coût total de l'itinéraire complet, qui est la somme des coûts de la PMS, de la plantation et des entretiens, est finalement très similaire à ceux obtenus pour des outils tractés classiques. Il faut dans cette approche également prendre en compte l'économie organisationnelle pour le gestionnaire par l'évitement de nombreux dégagements à organiser et surveiller.

FIGURE 3

VUES DES OUTILS DE PMS

Bident Maillard



Charrue bidisque motorisée



Scarificateur réversible



Culti-3B



Sous-soleur multifonction



Une fois les performances techniques assurées, la réduction des coûts s’obtient essentiellement par une augmentation de la productivité horaire des opérateurs lors des interventions.

La conception d’outils combinés qui réalisent plusieurs opérations en un seul passage permet de réduire les coûts totaux d’intervention. La Charrue bidisque motorisée® (Alliance Forêts Bois, Bordeaux, France) (figure 3, p. 541) est un outil tracté qui ameublisse le sol sur une profondeur de 30 cm, le fertilise et élimine la végétation sur une largeur de 80 cm, qui a permis de réduire les coûts de PMS de 20 % par rapport aux méthodes employées plus traditionnellement en moyenne montagne. Le Culti-3B (Grenier-Franco) (figure 3, p. 541) est un outil tracté qui décompacte le sol jusqu’à 40 cm et peut, dans les meilleurs cas, atteindre 75 cm de profondeur et réalise un billon de 20 cm de haut qui facilite l’installation des plants en situation d’engorgement (Ulrich *et al.*, 2014).

La mécanisation des entretiens après plantation fait actuellement l’objet de différents travaux (Alliance Forêts Bois ; Société Valenzisi, Aubréville ; Société Becker, Toul), qui explorent différentes options : broyeur monté sur chenillard ou sur robot, outil mécanique sur minipelle. Les outils conçus doivent répondre à une même série d’exigences : taille réduite, forte maniabilité, travail précis, polyvalence vis-à-vis de la végétation à éliminer.

- *Réduire les impacts environnementaux*

Des outils mécaniques montés sur minipelle (2 à 5 tonnes) ont été conçus pour la PMS en forêt. L’utilisation d’une minipelle permet de réduire les impacts primaires et secondaires sur le sol et la végétation. Le porte-outil, léger et muni de chenilles en caoutchouc, exerce une faible pression statique sur le sol. Par ailleurs, la minipelle est un engin maniable, particulièrement adapté à la réalisation de travaux intermittents, même en conditions d’accès difficile (pente, rochers, arbres, souches).

Une étude portant sur l’impact de la PMS intermittente sur les stocks de carbone du sol (Quibel, 2015) a montré que le Scarificateur Réversible® et le Sous-soleur Multifonction® (Grenier-Franco) (figure 3, p. 541) induisent un déstockage du carbone du sol sur les lignes de plantation travaillées. Néanmoins, le maintien de zones non travaillées, ainsi que le dépôt dans les interlignes non travaillées de la biomasse végétale extraite des zones travaillées semblent compenser ce déstockage. Des bilans totaux des stocks de carbone à l’échelle de la parcelle qui prennent en compte l’hétérogénéité du travail effectué sont prévus, qui permettront de raisonner la surface totale du travail intermittent réalisé par les machines et sa disposition spatiale dans la parcelle.

Une démarche complémentaire pour réduire les impacts environnementaux est de recourir à des outils combinés qui réalisent plusieurs opérations en un seul passage. Outre les gains de productivité évoqués plus haut, cette combinaison doit permettre de faire passer une seule fois les outils dans la parcelle et donc de mieux contrôler les impacts secondaires de l’intervention.

- *Réduire la pénibilité et les risques subis par les opérateurs*

La mécanisation des opérations, et tout particulièrement celle des entretiens, constitue une mesure importante pour améliorer la santé et la sécurité des ouvriers forestiers car elle permet de réduire les interventions manuelles, considérées comme très pénibles.

Les interventions mécanisées constituent elles aussi une source de pénibilité. Les conducteurs d’engins forestiers sont exposés à des secousses et des vibrations fortes, du fait de la nature souvent accidentée du terrain. En parallèle à une recherche de gains de productivité, les nouveaux engins conçus visent également à réduire l’intensité des vibrations émises par la machine, et leur transmission au conducteur. Pour cela, le recours à des engins plus lourds, notamment l’utilisation de midi-pelles (5 à 10 tonnes) à la place de minipelles (2,6 à 5 tonnes), et un meilleur aménagement des cabines permettent d’améliorer substantiellement le confort de l’opérateur.

CONCLUSIONS

Ces travaux, qui ont pour objectif d'innover dans les pratiques de plantation forestière, se basent sur la constitution et l'animation de réseaux d'acteurs. Ces réseaux assurent le développement de méthodes sylvicoles qui répondent au mieux aux attentes des praticiens, l'élaboration d'outils d'aide à la mise en œuvre concrète de ces méthodes et l'appropriation des méthodes par les acteurs concernés. Ces réseaux comportent l'ensemble des acteurs socioéconomiques concernés par la problématique, ainsi que des acteurs de recherche et du développement. Différentes disciplines sont mobilisées, de la sylviculture aux sciences du sol, l'écologie végétale, la sociologie et l'économie.

Ces réseaux reposent sur l'échange d'informations et le partage de connaissances, un des principaux leviers identifiés pour favoriser l'innovation en sylviculture. Pour l'instant, ces réseaux n'intègrent pas les collaborations économiques qui constituent le deuxième levier envisagé pour soutenir l'innovation, en permettant de partager les coûts entre acteurs et de réduire les risques encourus lors de la mise en œuvre des innovations.

Catherine COLLET
LERFoB, AgroParisTech, INRA
INRA Centre grand Est
Route d'Amance
F-54280 CHAMPENOUX
(catherine.collet@inra.fr)

**Claudine RICHTER – Erwin ULRICH –
Vincent BOULANGER**
Pôle RDI-ONF de Fontainebleau
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(claudine.richter@onf.fr)
(erwin.ulrich@onf.fr)
(vincent.boulanger@onf.fr)

Marieke BLONDET
LEF, AgroParisTech, INRA
AgroParisTech centre de Nancy
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(marieke.blondet@agroparistech.fr)

Christine DELEUZE
Pôle RDI-ONF de Dole
21 rue du Muguet
F-39100 DOLE
(christine.deleuze@onf.fr)

Mathieu DASSOT
EcoSustain
Bureau d'études en environnement, R&D
31 rue de Volmerange
F-57330 KANFEN
(contact@ecosustain.fr)

Myriam LEGAY
Pôle RDI-ONF de Nancy
Site de Nancy-Brabois
8 allée de Longchamp, CS 40212
F-54602 VILLERS LES NANCY CEDEX
(myriam.legay@onf.fr)

Financements

Les travaux présentés ont été réalisés grâce au soutien du ministère en charge des forêts (conventions E30/07, E16/2011, E13/2010, E21/2013), de l'ONF (conventions MGVF 2007 et 2011), la région Alsace (projet ALTER), le RMT AFORCE (projet PILOTE), France-Bois-Forêt (projet PILOTE), et l'ADEME (projet CAPSOL).

BIBLIOGRAPHIE

- AGRESTE. — Les pépinières forestières, les graines forestières. *In*: La forêt et les industries du bois en 2013. — GraphAgriBois, édition 2013.
- AKRICH (M.), CALLON (M.), LATOUR (B.). — À quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement ; 2 : Le choix des porte-parole. — *Annales des Mines*, 1988, 11-12, 4-17.
- ALTER (N.). — L'Innovation ordinaire. — Presses Universitaires de France, 2010 (Collection Quadrige).
- BALANDIER (P.), COLLET (C.), MILLER (J.H.), REYNOLDS (P.E.), ZEDAKER (S.M.). — Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighboring vegetation. — *Forestry*, 79, 2006, pp. 3-27.
- BIT. — Sécurité et santé dans les travaux forestiers: recueil de directives pratiques du BIT. — Genève : Bureau international du Travail, 1998. — 122 p.
- BOURIAUD (L.), KASTENHOLZ (E.), FODREK (L.), KARASZEWSKI (Z.), MEDERSKI (P.), RIMMLER (T.), RUMMUKAINEN (A.), SADAUSKIENE (L.), SALKKA (J.), TEDER (M.). — Policy and market-related factors for innovation in forest operation enterprises. pp. 276-293. *In*: Innovation in forestry: territorial and value chain relationships / ed. G. Weiss, D. Pettenella, P. Ollonqvist, B. Slee. — Wallingford, Oxon (UK): CAB International, 2011.
- BOUVAREL (L.). — Attentes et revendications des forestiers privés. — *Forêts de France*, 556, 2012, pp. 6-7.
- CARLING (P.A.), IRVINE (B.J.), HILL (A.), WOOD (M.). — Reducing sediment inputs to Scottish streams: a review of the efficacy of soil conservation practices in upland forestry. — *The Science of the Total Environment*, 265, 2001, pp. 209-227.
- COLLET (C.), GIBAUD (G.), GIRARD (Q.), DASSOT (M.), WEHRLÉN (L.), RICHTER (P.), PIAT (J.), FRAYSSE (J.Y.). — Contrôler la fougère aigle pour réussir les plantations. — *Forêt Entreprise*, 21, 2015, pp. 28-33.
- DROLET (S.), LEBEL (L.). — Forest harvesting entrepreneurs, perception of their business status and its influence on performance evaluation. — *Forest Policy and Economics*, 12, 2010, pp. 287-298.
- EDQUIST (C.). — Systems of innovation approaches. Their emergence and characteristics. pp. 1-35. *In*: Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations / ed. C. Edquist. — Pinter Publisher Ltd.
- ESPELTA (J.M.), RETANA (J.), HABROUK (A.). — An economic and ecological multi-criteria evaluation of reforestation methods to recover burned *Pinus nigra* forests in NE Spain. — *Forest Ecology and Management*, 180, 2003, pp. 185-198.
- GAGLIO (G.). — Sociologie de l'innovation. — Presses Universitaires de France, 2011. — 126 p. (Que sais-je ?).
- GOUDET (M.). — Suivi des plantations. — Département Santé des Forêts, MAAF, 2010.
- GOUTAL (N.). — Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. — AgroParisTech, 2012. — 221 p. (Thèse).
- GRANHUS (A.), FJELD (D.). — Time consumption of planting after partial harvest. — *Silva Fennica*, 42, 2008, pp. 49-61.
- HANSEN (E.N.). — The Role of Innovation in the Forest Products Industry. — *Journal of Forestry*, 2010, pp. 348-373.
- JANSSON (K.J.), JOHANSSON (J.). — Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. — *Forestry*, 71, 1998, pp. 57-66.
- KEES (G.). — Using subsoiling to reduce soil compaction. — USDA Forest Service, Technology and Development Program, 2008, 15 p.
- KRANABETTER (J.M.), SANBORN (P.), CHAPMAN (B.K.), DUBE (S.). — The contrasting response to soil disturbance between lodgepole pine and hybrid white spruce in subboreal forests. — *Soil Science Society of America Journal*, 70, 2006, pp. 1591-1599.
- KUBECZKO (K.), RAMETSTEINER (E.), WEISS (G.). — The role of sectoral and regional innovation systems in supporting innovations in forestry. — *Forest Policy and Economics*, 8, 2006, pp. 704-715.
- LAWRENCE (A.). — Adapting through practice: Silviculture, innovation and forest governance for the age of extreme uncertainty. — *Forest Policy and Economics*, 2016.
- LÖF (M.), DEY (D.), NAVARRO (R.M.), JACOBS (D.F.). — Mechanical site preparation for forest restoration. — *New Forests*, 43, 2012, pp. 825-848.
- LORNET (J.M.), PREVITALI (C.). — Métiers de la forêt, des métiers à forte pénibilité. Lien entre ressenti de la pénibilité et expression d'une volonté d'interrompre prématurément sa carrière. Rapport de recherche. — Université de Franche-Comté, 2009. — 100 p.
- NAUDET (V.). — Plaidoyer pour une relance des plantations forestières en France. — *Forêt Entreprise*, 203, 2012, pp. 62-63.

- NYBAKK (E.), CREPELL (P.), HANSEN (E.N.), LUNNAN (A.). — Antecedents to forest owner innovativeness: An investigation of the non-timber forest products and services sector. — *Forest Ecology and Management*, 257, 2009, pp. 608-618.
- NYBAKK (E.), LAWRENCE (A.), WEISS (G.). — Innovation in Forest Management for New Forest Owner Types – A Literature Review. *In* : Background Paper of Working Group 2 “New forest management approaches”, COST Action FP1201 “Forest Land Ownership Changes in Europe: Significance for Management And Policy”. — 2015.
- OECD. — Oslo Manual 3rd edition, Guidelines for collecting and interpreting innovation data. — OECD, 2005. — 163 p. [En ligne] disponible sur : www.oecd.org/sti/oslomannual
- PETENELLA (D.), MASO (D.). — Networks of small-medium enterprises operating in forestry: some theoretical concepts and empirical evidence. pp. 35-47. *In*: Innovation in forestry: territorial and value chain relationships / ed. G. Weiss, D. Pettenella, P. Ollonqvist, B. Slee. — Wallingford, Oxon (UK): CAB International, 2011.
- PETIT (A.). — L'Adoption de l'Innovation dans les pratiques forestières. Le cas des forestiers de Haute-Normandie. — Muséum national d'histoire naturelle, 2016. — 111 p. (Master 2 EDTS).
- QUIBEL (E.). — Effets des pratiques de contrôle de la végétation concurrente en contexte de plantation forestière sur les stocks de carbone et la qualité des matières organiques des sols. — Université de Rouen, 2015. — 26 p. (Master 2).
- RAMETSTEINER (E.), WEISS (G.). — Innovation and Entrepreneurship in Forestry in Central Europe. *In*: Draft paper presented at “Sustain Life – Secure Survival II” Conference, 22-25 September 2004, Prague, Czech Republic.
- RAMETSTEINER (E.), WEISS (G.). — Innovation and innovation policy in forestry: Linking innovation process with systems models. — *Forest Policy and Economics*, 8, 2006, pp. 691-703.
- ROGERS (E.M.). — Diffusion of innovations. — 3rd edition. — The Free Press, A Division of Macmillan Publishing Co., Inc, 1995. — 453 p.
- ROSA (J.). — Conduite de la création et du renouvellement des peuplements. *In*: Groupe technique n° 3 du RMT AFORCE. 3^e colloque de restitution des projets d'AFORCE, 4 et 5 décembre 2014, Pierroton.
- SLEE (B.). — Innovation in forest-related territorial goods and services: an introduction. pp. 118-130. *In*: Innovation in forestry: territorial and value chain relationships / ed. G. Weiss, D. Pettenella, P. Ollonqvist, B. Slee. — Wallingford, Oxon (UK): CAB International, 2011.
- STERBOVA (M.), LOUCANOVA (E.), PALUS (H.), IVAN (L.), SALKA (J.). — Innovation Strategy in Slovak Forest Contractor Firms – A SWOT Analysis. — *Forests*, 7, 118, 2016.
- STJERNBERG (E.), KINNEY (S.). — A tree planter's guide to reducing musculoskeletal injuries. — FP Innovations, 2007. — 48 p.
- TYREE (M.C.), SEILER (J.R.), AUST (W.M.), SAMPSON (D.A.), FOX (T.R.). — Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO₂ efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain. — *Forest Ecology and Management*, 234, 2006, pp. 363-369.
- ULRICH (E.). — Nouveaux besoins de plantation en forêt publique française : réflexion sur la plantation mécanisée ou manuelle. — *Rendez-vous techniques*, 43, 2014, pp. 3-10.
- ULRICH (E.), BECKER (C.), FRANCO (J.P.). — Préparer le sol avant plantation selon la technique « 3B » avec tracteur et l'outil Culti 3B® - Validation sur chantiers test. — *Rendez-vous techniques*, 43, 2014, pp. 11-21.
- UOTILA (K.), RANTALA (J.), HARSTELA (P.), SAKSA (T.). — Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. — *Silva Fennica*, 44, 2010, pp. 511-524.
- VON DER GÖNNA (M.A.). — Fundamentals of mechanical site preparation. — British Columbia Ministry of Forests, FRDA Report 178, 1992, 29 p.
- WEISS (G.). — The study of innovation in the forest sector: relevance and research background. pp. 1-9. *In*: Innovation in forestry: territorial and value chain relationships / ed. G. Weiss, D. Pettenella, P. Ollonqvist, B. Slee. — Wallingford, Oxon (UK): CAB International, 2011a.
- WEISS (G.). — Theoretical approaches for the analysis of innovation processes and policies in the forest sector. pp. 10-34 / ed. G. Weiss, D. Pettenella, P. Ollonqvist, B. Slee. — Wallingford, Oxon (UK): CAB International, 2011b.
- WISDOM (J.P.), CHOR (K.H.B.), HOAGWOOD (K.E.), HORWITZ (S.M.). — Innovation Adoption: A Review of Theories and Constructs. — *Adm Policy Ment Health*, 41, 2014, pp. 480-502.

UNE APPROCHE MULTIACTEUR ET MULTIDISCIPLINAIRE POUR INNOVER DANS LES PRATIQUES DE PLANTATION FORESTIÈRE (Résumé)

La plantation forestière est un outil important pour l'adaptation des forêts aux changements globaux. Les échecs parfois récurrents dans certains contextes, les coûts associés à la plantation, la pénibilité du travail pour les ouvriers forestiers ainsi que les impacts environnementaux parfois négatifs sont autant de facteurs qui freinent le recours à la plantation et peuvent ainsi limiter la capacité d'adaptation des forêts. Un ensemble de travaux ont été menés pour répondre aux besoins en innovation technique sur les méthodes de plantation exprimés par les praticiens. Ces travaux portent sur le processus d'innovation en sylviculture et sur l'amélioration technique des méthodes de plantation. L'analyse du processus d'innovation indique une faiblesse des réseaux sociotechniques associée à un mauvais partage des connaissances entre acteurs, et une réticence à l'investissement dans du nouveau matériel, dans un contexte économique perçu comme incertain. Ces observations suggèrent qu'un des leviers possibles serait une meilleure mise en réseau des acteurs, à travers différents liens fonctionnels : partage d'information, échanges de services, construction de partenariats économiques. Des exemples de méthodes innovantes pour réaliser chacune des différentes étapes de l'itinéraire de plantation (préparation du site, plantation, entretiens), répondant aux besoins d'innovation technique exprimés par les praticiens, sont ensuite présentés.

A MULTI-ACTOR PARTNERSHIP AND A MULTIDISCIPLINARY APPROACH TO INNOVATE FOREST PLANTING PRACTICES (Abstract)

Forest plantation is a major tool to adapt forest ecosystems to global change. Plantation failure that recurrently occur in some contexts, associated financial costs, the hard and repetitive nature of tree planting, and potential negative environmental impacts of forest plantation strongly reduce the use of plantation to regenerate forest stands. A series of studies was conducted to address the need for forest practitioners to innovate. The studies focus on the innovation process in silviculture, and on the technical improvement of plantation methods. The analysis of the innovation process highlights the weaknesses of the sociotechnical networks, in relationship with poor knowledge exchange practices, and strong reluctance to invest in new equipment in an uncertain future context. Developing stronger sociotechnical networks, based on information, service and financial flows, is a key to the development and diffusion of new silvicultural methods. Finally, examples of new methods, to execute the successive steps of forest planting (site preparation, planting, cleaning operations), addressing the expectations of forest practitioners, are presented.
