

GESTION DES PEUPELEMENTS EN FORÊT PUBLIQUE : NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION

**CHRISTINE DELEUZE – CLAUDINE RICHTER – ERWIN ULRICH – BRIGITTE MUSCH –
LAURENT DESCROIX – NOÉMIE POUSSE – PHILIPPE DREYFUS – JÉRÔME BOCK –
CATHERINE RIOND – 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. L'objet de cet article était de rendre compte de la démarche d'appropriation des travaux de recherche par les gestionnaires et notamment par le département Recherche, Développement et Innovation de l'ONF. Les auteurs de ce département tiennent à remercier les laboratoires associés à ces travaux et qui sont cités tout le long du texte : INRA, Irstea, FCBA, IRD, CIRAD...

Tandis que la surface forestière française a augmenté de près de six millions d'hectares en un siècle (près de 60 %), la récolte a quasiment doublé (IGN, 2013). Cette progression explique la position forte de la forêt française au rang européen, cependant la balance commerciale du bois et des produits dérivés (papiers, meubles) reste la seconde déficitaire après celle des produits pétroliers. Le décalage entre l'offre et la demande nationale de bois tient à la fois à un manque chronique de bois résineux de structure (en quantité mais aussi en qualité), qui oblige à une importation encore importante de bois du Nord ou de l'Est, mais aussi à une valorisation insuffisante de nos feuillus, malgré de nombreux travaux visant à plus les utiliser, par exemple en construction (FCBA, 2011).

Pourtant nous ne récoltons actuellement que 50 % de la production biologique, même si la forêt française est globalement jeune (beaucoup d'accrués dans le siècle dernier). La situation est moins accentuée en forêt publique et surtout domaniale (70 % de la production récoltée), où le stock de bois sur pied est maintenant stabilisé (Gamblin et Michon, 2011). Les régions identifiées de faible récolte sont plutôt en zone méditerranéenne pour des raisons de très faible productivité, ou en montagne cette fois pour des problèmes d'exploitabilité.

Parallèlement, le matériau bois est porteur de beaucoup d'espoir dans sa capacité à remplacer des matériaux fossiles et la pétrochimie : construction, fibre, énergie, chimie verte. Sa fabrication naturelle en forêt et son utilisation par la société sont gages d'atténuation du changement climatique, par séquestration mais surtout par substitution, cette substitution agissant de manière cumulative et définitive (Deleuze et Micheneau, 2015).

Face à cet espoir, les évolutions climatiques à moyen terme sont au contraire source de fortes inquiétudes, avec des disparités selon les contextes pédoclimatiques. Les temps forestiers étant longs comme pour la futaie de Chêne, dont la durée de production atteint 190 ans, les décisions doivent être prises en incluant un futur très incertain.

Pour relever ce défi de demandes plus fortes, mais aussi plus différenciées sur la ressource, et de menaces importantes sur son évolution, quels sont les leviers à la disposition des gestionnaires de la forêt publique ?

LA FORÊT FRANÇAISE AU CŒUR D'ÉVOLUTIONS FORTES...

Au-delà des évolutions en surface, la forêt française est au cœur des évolutions générales de la société.

La forte urbanisation de la population limite désormais l'extension supplémentaire de la surface forestière, dans le même temps des « propriétaires » devenus citoyens ont des demandes différentes vis-à-vis de leur forêt, et la société a une attente plus forte sur ces espaces « naturels », pas toujours consciente de l'emprise de l'homme dans le façonnage de la forêt d'aujourd'hui.

Les changements globaux ont des impacts contrastés sur cette forêt, avec des productivités plus fortes pour certaines essences sur quelques zones, mais associées à des risques accrus de tempêtes, d'incendies, d'attaques d'insectes, de maladies, de sécheresses répétitives et de dépérissement.

Les régénérations naturelles sont parfois difficiles avec l'arrêt des herbicides, l'augmentation de la densité du gibier depuis plus de 50 ans et une pluviosité accentuée en hiver et plus limitée au printemps. Une perte de technicité sur les plantations forestières s'ajoute à cette difficulté menant à de nombreux échecs de régénération (Collet *et al.*, 2016).

La diminution de la main-d'œuvre en forêt implique la nécessité de développer la mécanisation mais celle-ci induit des risques d'impact accrus sur les sols et les peuplements.

Les réglementations européennes et nationales deviennent de plus en plus importantes en matière d'environnement en lien aussi avec la certification, qui donne un cadrage assez contraignant et souvent à petite échelle.

L'industrialisation forte de la filière de première transformation crée une demande accrue en bois plus petits et standardisés (dévalorisation des gros bois de faible qualité). En parallèle, on observe un élargissement des usages du bois aussi bien en termes de bois reconstitués pour la construction, de matériaux innovants à base de fibres que de molécules complexes issues de la chimie verte et bien placées pour remplacer la pétrochimie.

Enfin, les volontés publiques sont fortes pour la forêt en matière de politique énergétique, associée à une politique d'atténuation des changements climatiques.

Cette liste souligne la complexité des évolutions fortes auxquelles sont confrontées nos forêts, avec des temps de survenue plutôt rapides pour nos systèmes ancrés dans la gestion durable à long terme.

... ET EN MÊME TEMPS LA FORÊT EST SOURCE D'ATTENTES IMPORTANTES

La forêt répond de plus en plus à des attentes fortes de la société à différentes échelles : un rôle très structurant dans la qualité et la diversité de ses paysages ; une source reconnue de biodiversité parfois remarquable et, sinon, toujours fonctionnelle ; une importance croissante de l'accueil du public à la recherche d'espaces naturels, surtout dans les forêts périurbaines ; une

source de produits divers, indispensables à l'approvisionnement de la filière bois (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois énergie, fibres...) mais aussi essentiels pour la structuration des tissus sociaux de nos territoires ruraux, grâce à des produits et services d'usages locaux (affouages, chasse, champignons). Enfin, la forêt est aussi essentielle à d'autres services, sans doute moins reconnus ni toujours récompensés, comme la séquestration de carbone, la qualité de l'eau, la régulation des crues, la protection des sols contre l'érosion et la prévention d'autres risques naturels en montagne ou sur les dunes.

La forêt, emblème des milieux naturels, est cependant aussi fortement façonnée par l'homme depuis des siècles pour tous ces services, comme en attestent l'empreinte de la gestion forestière sur la qualité génétique des chênes à Bercé, Tronçais ou Darney (Ducouso, RDVT à paraître), les campagnes de reboisement successives, notamment celles du siècle dernier des services RTM en montagne, et plus récemment les guides en sylviculture pour améliorer la qualité des bois. Convaincu de son empreinte sur la machine écologique à fabriquer le matériau bois, le gestionnaire se pose aussi des questions sur les attentes à venir de la filière. Par exemple, est-ce que la chimie verte, qui permet de valoriser les extractibles des nœuds de résineux, signifie qu'il faut produire du bois nouveau ?

Des innovations technologiques à mobiliser

Enfin, l'époque est à l'innovation technologique qui est porteuse d'opportunités :

- des progrès dans le matériel végétal et les outils pour l'améliorer (marqueurs génétiques, réseaux européens d'évaluation, *barcoding*) ;
- une appropriation des outils de mécanisation forestière issus des pays scandinaves avec la prise en compte des spécificités de la ressource française très feuillue et de la faible portance des sols ;
- des outils logistiques et informatiques de terrain pour le partage et le transfert de données ;
- les outils géomatiques et les technologies de télédétection à très haute résolution pour améliorer la connaissance de la ressource et de son accessibilité ;
- les outils d'analyse rapide pour évaluer la qualité des sols ;
- mais également les outils de modélisation pour affiner les approches sylvicoles et les évaluer avec des critères combinés.

Réflexion préalable sur les notions d'échelles

Le constat du décalage entre les échelles de temps s'impose : échelle longue du temps forestier (environ 100-180 ans), face à l'échelle plus rapide des changements en cours (environ 30-50 ans) et le temps court des réflexions des industriels (environ 15-20 ans). Comment prendre en compte les évolutions technologiques inéluctables (comme le canter sur les lignes rapides de sciage et la moindre valorisation des très gros bois en tranchage-menuiserie, cantonnés à des marchés de niche), en maintenant un axe stable pour la gestion ? Comment poursuivre des itinéraires à haute valeur ajoutée comme sur le Chêne, dans ces changements annoncés à plus court terme ? Peut-on introduire plus d'itinéraires accélérés sur certains résineux d'intérêt ?

En parallèle de ce conflit d'échelles temporelles, on a un décalage dans les échelles de production industrielle. En effet, plusieurs démarches s'affrontent depuis toujours mais de manière plus prégnante aujourd'hui :

- des démarches de masse, du type papeterie et maintenant bioraffinerie, pour produire en quantité, mais avec une forte dégradation de la matière (molécules assez dégradées, avec peu de spécificité en entrée). Dans ce cas, l'enjeu du gestionnaire sera d'être extrêmement vigilant

au maintien de la durabilité de ses sols et de ses peuplements, avec la difficulté d'une rentabilité industrielle limitée (rendements matière et surtout énergétique), et avec une faible valeur ajoutée de ces utilisations ;

— des valorisations de niche pour des molécules plus complexes, par exemple des extractibles, disponibles dans certaines essences (encore résineuses) ou certaines parties de l'arbre (nœuds, écorce). Ces démarches plus ciblées ont *a priori* une plus forte valeur ajoutée mais demanderont sans doute de petites quantités de matière et un savoir-faire pointu. L'enjeu sera là plutôt d'avoir une interaction forte avec la recherche-développement industrielle pour être vigilant à proposer nos essences diverses et notamment feuillues, et à apporter rapidement des informations de disponibilité et la mobilisation potentielle en regard. Signalons l'initiative intéressante de nos collègues belges qui avaient monté un master Xylochimie à Gembloux pour associer une évaluation de la ressource à ces nouvelles valorisations du bois.

Le forestier observe la diversité exceptionnelle de la forêt française et il est souvent dépité par le peu de valorisation de cette diversité. En regard, l'industriel attend une ressource standardisée et homogène et souffre de la forte hétérogénéité de la ressource proposée. Les exemples présentés dans la suite sont plutôt des illustrations de la première démarche qui conduit à innover pour améliorer la récolte de masse. Est-ce que les attentes de la bioéconomie sous-entendent uniquement une mobilisation de masse de la ressource, au sens d'une biomasse indifférenciée ? Comment assurer cette récolte de masse de manière durable ?

QUELQUES EXEMPLES D'INNOVATION POUR RÉPONDRE À CES ENJEUX

Aider la régénération en contexte de fougère envahissante mais non bloquante

La Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) est une plante vivace fortement concurrente pour l'installation de semis et ensuite la survie des plants. Si des solutions sont recherchées par préparation du sol en contexte de compétition bloquante (Collet *et al.*, 2016), la fougère doit aussi être maîtrisée une fois les semis installés. Dans ce cas, le bâtonnage manuel se révèle une solution très efficace et d'ailleurs connue depuis longtemps (Lorne, 1955 ; Perrier, 1957). Cependant ces travaux de dégagement de faible valeur ajoutée présentent une forte pénibilité pour les ouvriers (Gamblin, 1986). Le bâtonnage a alors été remplacé par le débroussaillage qui se révèle contre-productif en stimulant la repousse beaucoup trop rapide de la fougère. La solution alternative en utilisant de l'asulame, herbicide sélectif de la fougère, est actuellement limitée puisque ces produits phytopharmaceutiques sont de moins en moins autorisés en forêt, et que l'ONF s'engage fortement dans les démarches PEFC et ISO 14001. Cette solution n'est plus actuellement utilisée que très ponctuellement et seulement pour les cas de blocage complet.

Une solution mécanisée a donc été recherchée en adaptant le principe du bâtonnage manuel et en étudiant la dynamique naturelle de la fougère. Deux objectifs sont alors visés : l'arrêt du développement en hauteur, la fougère bâtonnée pouvant même jouer un rôle utile de gainage pour les plants ; et l'épuisement de la partie restante de la fougère, qui tentera de faire survivre les rangées de feuilles (appelées « frondes ») et ne fera pas pousser de nouvelle tige. Des échanges entre l'ONF et la société Grenier-Franco ont permis de développer un bâtonneur mécanique, permettant d'imiter les gestes autrefois réalisés par les ouvriers forestiers. Entre 2013 et 2015, 4 prototypes ont été successivement testés, et un bâtonneur mécanisé est aujourd'hui en vente pour une utilisation avec une pelle de 8-10 tonnes et avec une productivité journalière multipliée par 4 à 8 par rapport au bâtonnage manuel. Actuellement, 9 bâtonneurs ont été achetés par les agences travaux de deux régions. Un guide est disponible depuis le début du printemps 2017 pour aider à leur utilisation (Ulrich *et al.*, 2017).

Ce cas assez exemplaire d'innovation rapide a nécessité de nombreux allers-retours avec le constructeur, des tests en forêt dans des conditions contrastées, une innovation technique bien conçue sur la base d'un travail manuel qui était déjà connu, mais associé aussi à une bonne connaissance de la plante. Dans ce processus, la connaissance de l'organisation des travaux de dégagement et la prise en compte des coûts se révèlent aussi indispensables pour une bonne appropriation de la technique.

Une mécanisation respectueuse des sols

Si la mécanisation forestière a progressé régulièrement au siècle dernier pour pallier la diminution de la main-d'œuvre en forêt et améliorer les conditions de travail des intervenants, les exploitations d'urgence après la tempête de 1999 ont montré la forte sensibilité des sols forestiers au tassement et à l'orniérage. Plus récemment, la forte demande en bois énergie a conduit à utiliser de nouvelles machines pour récolter des premières éclaircies et des houppiers. Un fort enjeu est donc de trouver des solutions permettant d'exploiter ces coupes de manière durable, sans impacter irrémédiablement les sols. Ces solutions nécessitent à la fois : de mieux comprendre les processus conduisant au tassement et à l'orniérage [transmission des forces entre machine et sol, en fonction des poids des engins (à vide et en charge utile), des surfaces de contact (roues, *tracks* ou chenilles) et des propriétés mécaniques des sols] ; d'étudier les possibilités d'évolutions techniques des machines (poids et portance) en conformité avec la réglementation des transports et avec un surcoût limité ; et enfin de réfléchir à l'organisation complète du chantier à différentes échelles, en tenant compte de la saisonnalité et en veillant à maintenir la productivité actuelle, afin de ne pas pénaliser financièrement encore plus une filière qui a du mal à vivre de l'exploitation, dans des régions à sols très sensibles.

Ces travaux menés depuis 2011, en collaboration avec FCBA, nécessitent des échanges très étroits à la fois avec les constructeurs de machines et avec les exploitants, avec un processus itératif d'amélioration par tests successifs et retours vers eux. Le guide *Pratic'sol* qui paraîtra bientôt (projet FNEDT-ONF-FCBA, financé par France-Bois-Forêt) en est le résultat et regroupe les recommandations principales à la fois sur les matériels, leurs conditions d'utilisation et leur adaptation aux contextes, et tous les éléments indispensables à la planification puis à l'organisation des chantiers. D'autres travaux encore au stade de recherche sont en cours pour aider au diagnostic de sensibilité des sols (projet européen *Efforte*). Enfin des travaux de recherche ont aussi démarré sur la restauration de ces sols quand ils ont été trop fortement impactés, par exemple sur les cloisonnements.

Cet exemple montre toute la complexité du processus d'innovation, qui nécessite non seulement de bien prendre en compte les aspects techniques des différents interlocuteurs, mais aussi d'intégrer les solutions dans des habitudes et les contraintes de fonctionnement des exploitants.

Exploitation de bois d'œuvre en Guyane respectueuse de l'environnement

L'exploitation forestière de bois d'œuvre en Guyane fait l'objet d'un fort débat de par l'impact potentiel qu'elle implique pour accéder aux grumes ciblées et la difficulté à prospecter sur le terrain. Les outils géomatiques apportent alors un énorme gain technique à la fois à la prospection et à la planification de l'exploitation. Les informations spatialisées sont obtenues par le lidar aérien qui permet dans un premier temps d'identifier les zones à plus fort enjeu de récolte, en écartant, par géotraitement du MNT (modèle numérique de terrain), les zones trop accidentées et, par celui des MNC (modèle numérique de canopée), celles peu riches en gros bois. Une fois les zones prioritaires de récolte ciblées, tous les critères d'exploitabilité sont pris en compte : zonage des pentes, bas fond et proximité des rivières à éviter lors de l'exploitation ;

positionnement optimisé des routes à camion et des pistes à tracteur pour réduire les linéaires de voirie, améliorer la fonctionnalité de la desserte et éviter les zones sensibles ; information sur les volumes mobilisables permettant de calibrer les gabarits des dessertes ; informations quantitatives pour le bilan économique de l'opération (entre coût des travaux de pistes et récolte). Toute cette chaîne maintenant disponible sur SIG permet de valoriser le temps disponible du gestionnaire pour une prospection plus efficace de terrain. Elle oriente en même temps les récoltes sur les zones les plus pertinentes économiquement en évitant les zones les plus sensibles.

Cette innovation bénéficie à nouveau d'un travail étroit entre un service de RDI impliqué dans des travaux de recherche pointue et récente (projet ANR FORESEE terminé en 2014) et les services de gestion locaux, avec une accessibilité des outils par les SIG.

Concevoir des itinéraires pour la production de petits sciages résineux en veillant à la durabilité des sols avec le projet ICIF

De manière beaucoup plus prospective, le département RDI de l'ONF a réfléchi à des itinéraires plus productifs qui pourraient être installés en remplacement de peuplements appauvris, sur des sols acides et dans des zones de forte vulnérabilité aux tempêtes. L'idée serait de pouvoir répondre à l'attente forte de la filière en petits sciages résineux pour la construction et en biomasse, en valorisant des surfaces avec des essences à fort potentiel de production, même sur sols difficiles (Berthelot *et al.*, 2014). Des itinéraires ont été construits pour Douglas, Épicéa et Pin maritime afin d'en tester la rentabilité économique en itinéraires plus courts et semi-dédiés (Rakotoarison *et al.*, 2015), mais un dispositif expérimental ambitieux a aussi été installé pour en suivre l'évolution, avec l'analyse des sols et de la biodiversité sur ces sols pauvres. En plus des essences et des itinéraires, l'installation a permis de tester le travail du sol et l'apport de cendres de bois propres comme amendement initial (Pousse *et al.*, 2014).

Les résultats complets de ce projet ne seront disponibles que dans quelques années, mais ce travail apporte déjà des éléments quantitatifs et objectifs pour enrichir la liste des itinéraires proposés aux gestionnaires.

Restaurer les sols appauvris à l'aide d'amendements ou de cendres en circuit court

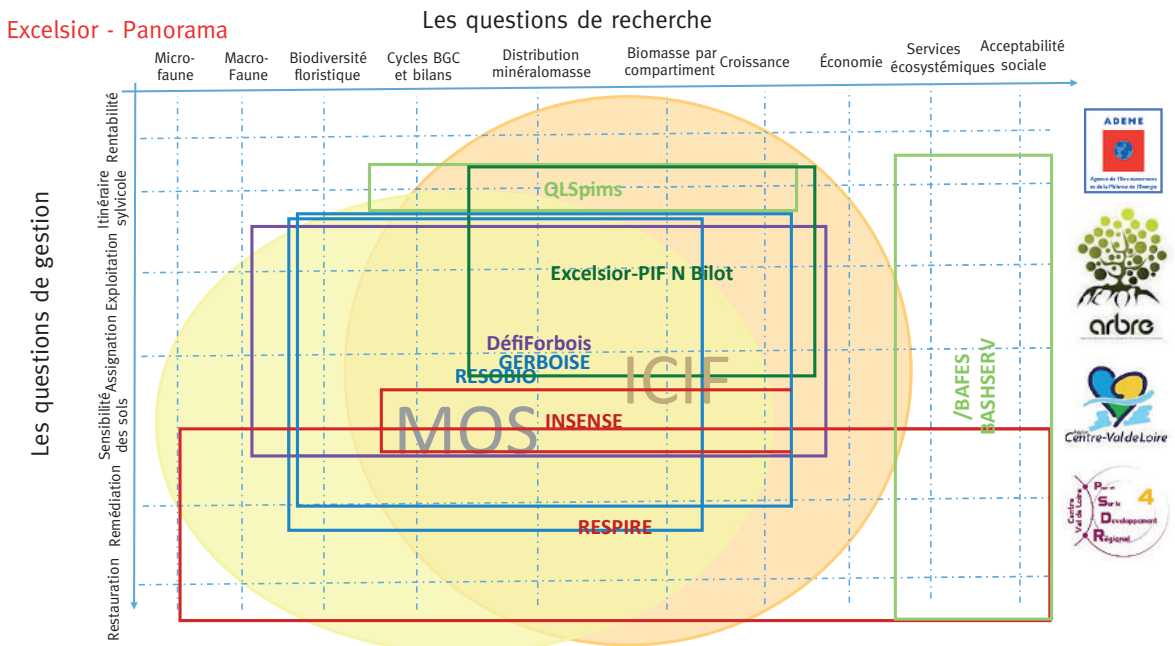
Dans la continuité du projet précédent, le département RDI a fait de la veille et du benchmarking sur la question des cendres de bois propre, considérées comme déchets mais avec pourtant un intérêt potentiel pour faire de l'amendement et de l'apport minéral sur des sols à faibles pH, dont on voudrait maintenir le niveau de production. La réglementation calée sur les contraintes en agronomie en interdit actuellement l'usage en forêt, mais les chercheurs travaillent sur leur potentiel et notamment dans une réflexion de circuits courts. La forme de ces cendres pour l'épandage est importante (éteintes et agglomérées, voire granulées) et leur prétraitement permet de les associer à d'autres éléments nutritifs (par exemple, la magnésie). Cependant les projets en cours en lien avec l'ADEME montrent l'importance de raisonner l'utilisation potentielle en forêt en associant toute la chaîne d'acteurs : les industriels qui mélangent actuellement des cendres propres dites « sous foyers » et des cendres plus concentrées en métaux lourds « multicyclone », les logisticiens des plateformes de compostage qui utilisent déjà des cendres mais à destination des agriculteurs, les propriétaires (cette fois en associant la forêt privée) et le grand public pour mieux comprendre l'acceptabilité de ce genre de pratiques.

Dans cet exemple, le principe simple d'un circuit court des éléments minéraux en forêt montre la complexité du système et des jeux d'acteurs et nécessite pour progresser d'associer très en amont les industriels du bois énergie, les gestionnaires, les propriétaires et la société.

Raisonnement l'exportation des « rémanents » en tenant compte des conditions réelles d'exploitation : le consortium Excelsior

Face à la pression de récolte d'arbres entiers pour la biomasse, l'ADEME a demandé en 2012 à un groupe d'experts pilotés par le GIP ECOFOR une analyse du guide publié en 2006 sur l'exportation des « rémanents ». Le projet RESOBIO (Landmann et Nivet, 2014) a ainsi permis de montrer que la clé de 2006 de diagnostic de sensibilité des sols à cette exportation n'était pas toujours adaptée et que, par ailleurs, il fallait tenir compte des conditions réelles d'exploitation des chantiers et notamment quantifier, selon les types de récoltes, les pertes réelles de matière en forêt. Ce projet a révélé aussi des marges de progression notamment sur les outils accessibles aux gestionnaires et sur les possibilités de restauration des sols. Plusieurs projets ont alors été construits, plus ou moins « recherche », selon les points de progression, mais l'ensemble des experts, chercheurs et gestionnaires participants à ces montages ont réfléchi plus largement à une organisation des axes de travail nécessaires en recherche, parallèlement aux questions posées en gestion, aboutissant à un large consortium « Excelsior » piloté par l'INRA-BEF (figure 1, ci-dessous).

FIGURE 1 ORGANISATION DU CONSORTIUM EXCELSIOR ANIMÉ PAR L'INRA-BEF (LAURENT SAINT-ANDRÉ) ET L'ONF-RDI (CHRISTINE DELEUZE)



Le poste interface INRA-ONF de Nicolas Bilot (2015-2018) vient aussi en renfort notamment sur l'appropriation des outils d'estimation des exportations minérales selon différents scénarios sylvicoles et de récolte à l'échelle d'une révolution forestière complète. Des pistes sont aussi identifiées pour interagir avec les exploitants et trouver des solutions pour laisser plus de menus bois, écorces et feuilles en forêt. Ce consortium embarque par ailleurs le réseau d'acteurs identifié dans le thème précédent sur les cendres.

Sauvegarder les ressources génétiques des populations du sud de leur aire et soutenir l'adaptation au nord avec le projet GIONO

Dans le contexte des changements climatiques et de déplacement des aires de répartition des essences, les travaux historiques de conservation des ressources génétiques du pôle CGAF du département RDI révèlent toute leur richesse. En effet un réseau graines et plants et des unités conservatoires ont été développés ces 20 dernières années pour plusieurs essences de production (Chêne, Hêtre, Sapin, Épicéa et Pin sylvestre) en priorisant plus récemment la surveillance des zones de forte vulnérabilité, en limite chaude et sèche de leurs aires de répartition. Pour trois essences majeures pour la filière, Chêne, Hêtre et Sapin, un projet plus ambitieux de migration assistée est mené pour conserver ces ressources et tester leur potentiel de valorisation à des fins d'adaptation.

Ce projet a pu être mené à bien grâce à l'implication forte des pépinières du pôle national des ressources génétiques forestières (PNRGF) regroupées au sein du département RDI depuis 2013, qui ont assuré la récolte des graines et l'élevage des plants pendant deux ans. Avec ce matériel de la marge sud de l'aire de ces espèces (unités conservatoires par exemple de Chizé, Les Colettes, La Sainte-Baume), des peuplements sont installés dans les cœurs d'aire, respectivement à Verdun (Hêtre et Chêne) et à Levier (Sapin, en cours). Ce projet doit se poursuivre sur plusieurs années afin d'échantillonner le maximum de la diversité génétique contenue dans ces populations marginales et de multiplier les sites installés. Les plantations sont dimensionnées de manière qu'il reste au terme du cycle sylvicole suffisamment de semenciers pour assurer une nouvelle génération plus adaptée, fruit de ce transfert et des échanges avec les peuplements locaux. Les résultats intermédiaires permettront par ailleurs de donner des conseils de migration assistée aux gestionnaires pour les peuplements méridionaux.

Ce projet complètement porté par le département RDI est plutôt à un stade de démonstration plus que d'innovation effective, mais l'exemple est donné et souligne l'importance du fonctionnement étroit entre la conservation génétique de ces essences dans les unités conservatoires mises en place par le CGAF, le développement des plants assuré par le PNRGF et l'installation en forêt en lien avec les gestionnaires.

Plus largement en génétique, d'énormes marges de progrès technique sont attendues en solutions proposées pour des zones de vulnérabilité. En plus de ces travaux GIONO sur la migration assistée, des travaux sont menés sur les provenances et les espèces adaptées à différents contextes, ainsi que sur la sélection génétique, en élargissant les critères de sélection aux notions de résistance et de résilience.

Utiliser l'information spatialisée continue pour définir des stations en environnement changeant

Pour terminer sur les innovations en cours ou en germe, il faut aborder l'échelle essentielle de l'aménagement qui permet de projeter des évolutions éventuelles des peuplements et itinéraires en cours : identifier des zones de vulnérabilité aux risques (tempête, incendies, essences mal adaptées aux conditions à venir) et les stades possibles d'intervention. Pour ce faire, une étape cruciale est, malgré toutes les incertitudes, d'évaluer le devenir des stations (zone homogène dans ses conditions climatiques et édaphiques). Des travaux sont menés en ce sens depuis plus de dix ans pour utiliser la bioindication avec la flore forestière (Gégout *et al.*, 2003) et évaluer de manière continue les propriétés des sols. En parallèle des modèles climatiques spatialisés en lien avec une caractérisation des réserves utiles permettent de faire des bilans hydriques (Piedallu *et al.*, 2016). Plus récemment des travaux s'appuyant sur le lidar aérien et des approches géomorphologiques permettent de renforcer la caractérisation de ces réserves pour des sols sur un fort relief (Dubois, 2015). Des modèles de niche et d'autres de productivité pour quelques

essences ont alors été établis afin d'essayer de prédire l'adaptation de ces essences aux changements climatiques, à différentes résolutions spatiales et temporelles. Ces travaux développés au niveau national ont ensuite été testés à l'échelle plus locale de la gestion dans le cadre du poste d'interface de Paulina Pinto (2012-2014, Pinto, 2016). Enfin, une approche complémentaire des modèles de niche a été construite pour appréhender les limites de compatibilité climatique des essences et est actuellement testée (projet IKS-Map1 du RMT Aforce).

L'ensemble de ces outils doit être mis à disposition des gestionnaires, avec une difficulté particulière de leur appropriation et de leurs limites, ainsi que la nécessité d'appréhender les incertitudes qui y sont associées (incertitudes des modèles cités mais aussi celles des prédictions climatiques issues d'autres modèles encore).

Prendre en compte les incertitudes à l'échelle de l'aménagement et aider le dialogue autour d'outils de simulation multivariés

Sur la base des travaux sur les stations, un enjeu fort existe enfin sur les outils de simulation que l'on peut mettre à disposition des aménagistes pour visualiser l'évolution des forêts analysées et notamment en proposant des inflexions dans la gestion (structures, itinéraires, provenances, essences) et en projetant les conséquences à moyen et long terme. Un tel outil paraît maintenant indispensable pour anticiper l'évolution des récoltes mais aussi des autres services : les modèles de croissance, largement développés ces dernières années pour beaucoup d'essences et utilisés systématiquement pour aider à la construction des guides de sylviculture, peuvent être maintenant valorisés dans ces approches à plus large échelle et en utilisant les différentes sorties qui en sont issues et qui s'enrichissent (production, qualification des produits, économie, carbone, minéralomasse...). De telles simulations devraient servir aux gestionnaires d'outil de dialogue avec les parties prenantes pour décider des priorités et des éventuelles évolutions, en considérant un panel de critères. Face aux incertitudes, un petit pourcentage de la surface pourrait être réservé à des solutions alternatives (essence, provenance ou itinéraire) pour diversifier les solutions.

Cette dernière approche va être testée dans le cadre d'un aménagement pilote, même si de nombreuses difficultés apparaissent encore quant à l'appropriation de ces outils. Il faut cependant souligner leur intérêt prospectif et, à cette occasion, l'importance de la mutualisation des réseaux expérimentaux de long terme qui permettent de les construire et les faire évoluer (notamment le GIS Coopérative de données pour la modélisation : Cordonnier *et al.*, 2014), ainsi que la mutualisation des développements de modèles (plateforme CAPSIS, Dufour *et al.*, 2011).

QUELQUES LEÇONS À EN TIRER POUR AMÉLIORER L'INNOVATION EN GESTION VOIRE SUR TOUTE LA FILIÈRE

Finalement ces exemples, à différents stades d'innovation, depuis plutôt « I » jusqu'à totalement « R&D », illustrent le rôle d'un département RDI dans un établissement tel que l'ONF qui, pour répondre à un besoin technique, va identifier les contraintes et les leviers non seulement dans sa gestion, mais aussi chez les interlocuteurs, pour aller jusqu'à l'appropriation par les gestionnaires de ces progrès issus de la recherche.

Les premiers exemples présentés, plutôt au stade de l'innovation, ont été réalisés avec des premières idées techniques d'amélioration, mais ensuite grâce à une interaction forte entre constructeurs d'une part et entrepreneurs de l'autre. Les exemples plus complexes évoqués ensuite ont montré que, dans ce contexte très contraignant et avec beaucoup d'incertitudes, les solutions

innovantes apparaissent quand on arrive à associer toute la chaîne d'acteurs dans la réflexion : bien faire comprendre aux industriels comme aux exploitants les contraintes du gestionnaire, mais s'intéresser aussi à leurs raisonnements et leurs difficultés, d'autant plus que ces deux secteurs sont en forte difficulté économique.

L'ensemble des exemples évoqués dans cet article concernent des innovations pour permettre une récolte accrue « de masse », mais respectueuse de nos écosystèmes. Conscient de la richesse, de la diversité de sa forêt, le gestionnaire serait aussi intéressé à participer aux travaux plus pointus et à forte valeur ajoutée, qui peuvent émerger en chimie verte ou sur les biomatériaux composites. Interagir avec la R&D sur ces recherches de molécules ou fibres plus ciblées et de niche, serait un moyen de mieux valoriser la diversité de notre ressource et d'aider les industriels à accepter son hétérogénéité et à en tirer parti.

Enfin le rôle du gestionnaire est aussi d'appréhender les différents objectifs donnés à une forêt : récolte de matériau mais aussi services écosystémiques, carbone, eau, accueil du public. Il faut de plus en plus associer les différents acteurs de la société au choix des priorités, sachant que souvent seul le service de production est rémunéré. Cette nécessité est d'autant plus forte que cette chaîne d'acteurs n'existait pas naturellement en France : un fossé perdure entre amont et aval, même si les politiques en sont conscients, comme en atteste le Contrat stratégique de filière bois signé en décembre 2014. De même, la société est très peu consciente de la complexité de l'environnement forestier et des services qu'il procure sans rémunération et avec une forte sensibilité aux changements.

Le gestionnaire peut réfléchir à quelques itinéraires, que l'on pourrait qualifier de semi-dédiés, pour répondre à certaines attentes industrielles, mais qui pourraient aussi répondre à des besoins locaux de raccourcissement des révolutions, de valorisation des peuplements ou de changement d'essence. Cependant il cherchera aussi à répondre aux autres enjeux associés à la gestion multifonctionnelle, ayant également à cœur d'aller vers des valorisations plus fortes du matériau bois (BO cible avec récoltes de BI-BE intermédiaires et associées). La solution sera sans doute dans des choix à faire à l'échelle de l'aménagement ou du massif forestier où il faudra mêler les stratégies pour diversifier à cette échelle les fonctions attendues de la forêt.

En contexte d'incertitude, la diversification au sens large des solutions est aussi une stratégie pour l'adaptation...

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

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

Brigitte MUSCH
Conservatoire génétique des arbres forestiers
2163 avenue de la Pomme de Pin
F-45160 ARDON

Laurent DESCROIX
Pôle RDI-ONF de Cayenne
Réserve de Montabo
BP 7002
F-97307 CAYENNE CEDEX
(laurent.descroix@cnf.fr)

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

Philippe DREYFUS
 Pôle RDI-ONF d'Avignon
 1175 chemin du Lavarin
 F-84000 AVIGNON
 (philippe.dreyfus@onf.fr)

Jérôme BOCK – Catherine RIOND
 Pôle RDI-ONF de Chambéry
 42, quai Charles Roissard
 F-73000 CHAMBERY
 (jerome.rock@onf.fr)
 (catherine.riond@onf.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHELOT (A.), BOUVET (A.), RICHTER (C.), GIBAUD (G.). — Potentialités de production de biomasse de quelques essences résineuses en conditions forestières : Douglas, Épicéa commun, Épicéa de Sitka, Cyprès de Leyland, Séquoia toujours vert, Cryptomère du Japon, Pin maritime. — *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 5, 2014, pp. 695-713.
- Le Contrat de filière CSF bois. — Conseil national de l'industrie, 2014. — 38 p. [En ligne] disponible sur : http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/conseil-national-industrie/Contrats_de_filieres/Contrat-de-filiere-bois-signe-dec-2014.pdf
- COLLET (C.), RICHTER (C.), ULRICH (E.), BLONDET (M.), DELEUZE (C.), BOULANGER (V.), DASSOT (M.), LEGAY (M.). — Une approche multiacteur et multidisciplinaire pour innover dans les pratiques de plantation forestière. — *Innovations agronomiques*, vol. 56, 2016, pp. 23-35.
- CORDONNIER (T.), POFFET (L.), RICHTER (C.), SEYNAVE (I.). — La Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers. — Plaquette de présentation réalisée pour les 20 ans du GIS Coop. — 2014. — 4 p.
- DELEUZE (C.), MICHENEAU (C.), (coord). — Polémique autour du « carbone neutre » : quels leviers à la disposition des gestionnaires forestiers pour l'atténuation du changement climatique ?. — *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n° 48-49, 2015, pp. 48-53.
- DUBOIS (E.). — Cartographie automatique des sols et liens avec la dendrométrie grâce aux données du LIDAR. — Université Savoie Mont-Blanc, 2015. — 61 p. Rapport de Master 2 EPGM (Équipement, Protection et Gestion des milieux de Montagne).
- DUFOUR-KOWALSKI (S.), COURBAUD (B.), DREYFUS (P.), MEREDIEU (C.), DE COLIGNY (F.). — Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. — *Annals of Forest Science*, 9 novembre 2011. Doi:10.1007/s13595-011-0140-9.
- FCBA. — Perspectives de valorisation de la ressource de bois d'œuvre feuillus en France. Rapport pour le ministère en charge de l'Agriculture. — FCBA, 2011. — 83 p.
- GAMBLIN (B.), MICHON (J.-M.). — Récolte et évolution du stock de bois dans les forêts publiques. — *Rendez-vous techniques de l'ONF*, édition exceptionnelle Colloque interne « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité », Paris 7 et 8 mai 2011, pp. 38-47.
- GAMBLIN (B.). — La Maîtrise de la Fougère aigle. — *Arborescences*, n° 4, 1986, pp. 15-18.
- GÉGOUT (J.-C.), HERVÉ (J.-C.), HOULLIER (F.), PIERRAT (J.-C.). — Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 14, n° 1, 2003, pp. 55-62.
- IGN. — Un siècle d'expansion des forêts françaises : De la statistique Daubrée à l'inventaire forestier de l'IGN. — *L'IF*, n° 31, mai 2013, 8 p.
- LANDMANN (G.), NIVET (C.) (Coord.). — Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Rapport final. — Angers : ADEME ; Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor, 2014. — 243 p.

- LORNE (R.). — Propos sur la régénération du Chêne dans l'Ouest. — *Revue forestière française*, n° 6, 1955, pp. 476-487.
- PERRIER (R.). — Continuité forestière. — *Revue forestière française*, n° 5, 1957, p. 419.
- PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J.-C.), LEBOURGEOIS (F.), SEYNAVE (I.). — Soil Aeration, Water Deficit, Nitrogen Availability, Acidity and Temperature All Contribute to Shaping Tree Species Distribution in Temperate Forests / Sándor Bartha, editor. — *Journal of Vegetation Science*, vol. 27, n° 2, mars 2016, pp. 387-399. doi:10.1111/jvs.12370.
- PINTO (P.E.). — Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant. — Rapport Exécutif Convention de Recherche/Développement QNF-INRA, Nancy, 2016. — 135 p.
- POUSSE (N.), GIBAUD (G.), RICHTER (C.), DELEUZE (C.). — Gestion de la fertilité de sols forestiers acides par recyclage de cendres de bois : présentation du dispositif expérimental ICIF (Itinéraires de Cultures Innovantes en Forêt pour la production de biomasse) dans les Ardennes. Poster. — 12^{es} Journées d'étude des sols (JES), 30 juin - 4 juillet 2014, Le Bourget du Lac.
- RAKOTOARISON (H.), CAILLY (P.), DELEUZE (C.), RICHTER (C.), BERTHELOT (A.). — Plantations résineuses en conditions forestières : analyse économique des itinéraires dédiés et semi-dédiés pour augmenter la production de bois. — *Revue forestière française*, vol. LXVII, n° 6, 2015, pp. 515-538.
- ULRICH (E.), BAUDET (V.), FRANCO (J.-P.), MANDRET (X.), MICHENEAU (C.), LEGROS-DELAHAYE (C.), PITTARD (J.-C.). — Utilisation du bâtonneur mécanique de la Fougère aigle : outil Grenier-Franco. Guide technique. — Fontainebleau : ONF - Département recherche, développement et innovation, 2017. — 8 p.

GESTION DES PEUPELEMENTS EN FORÊT PUBLIQUE : NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION [Résumé]

Même si la surface de la forêt française a progressé de 60 % en un siècle, la plaçant à la quatrième place au rang européen, que sa récolte a dans le même temps doublé, la balance commerciale du bois et des produits dérivés est la seconde déficitaire au niveau national. Cette forêt est également confrontée à d'importants changements : climatiques, pouvant faire varier sa composition et son étendue spatiale ; sociétaux, avec de moins en moins de main-d'œuvre en forêt simultanément à une prise de conscience des nombreux services écosystémiques rendus par ces espaces naturels ; mais surtout mondiaux avec la diminution des ressources fossiles, qui peuvent être pour partie remplacées par ce matériau polyvalent qu'est le bois. Le bois est effectivement une ressource renouvelable qui peut répondre à différents besoins de nos sociétés (construction, meubles, emballage, papier, chimie, matériaux composites, énergie), avec une utilisation des produits en cascade, jusqu'à un recyclage final ou une valorisation énergétique, assurant une production de matière et d'énergie à faible niveau de dioxyde carbone, particulièrement efficace. Pour relever ce défi conjoint de demandes plus fortes et plus différenciées sur la ressource, et de menaces importantes sur son évolution, quels sont les leviers à la disposition des gestionnaires de la forêt publique ? Cet article présente quelques pistes d'innovations à l'interface entre recherche et gestion, qui explorent des solutions différenciées mais ciblées sur des attentes des gestionnaires. La diversité des exemples en exploitation, renouvellement des peuplements, sylviculture et suivi de la fertilité des sols, souligne la richesse des innovations potentielles et le besoin de les mêler pour répondre aux attentes de la société. La forêt publique est façonnée par l'homme depuis des siècles, permettons-lui ensemble de s'adapter, et de nous aider à relever le défi d'une société plus sobre, valorisant les matériaux renouvelables, tout en continuant à assurer les multiples services écosystémiques.

NEW INCLINATIONS OF RESEARCH, DEVELOPMENT AND INNOVATION FOR PUBLIC FOREST IN REGARD TO BIOECONOMY PERSPECTIVES [Abstract]

The area of French forest has grown by 60% in a century, and is at the fourth position on the European rank; its harvesting was doubled at the same time; however the national trade-balance of the wood products sector is still in deficit. This forest is also facing important changes: climatic (composition and productivity of forest are affected, frequency and intensity of forest disturbances increase), societal (workers are fewer in the forest and we are more aware of benefits and services to society provided by forest) and bioeconomic (fossil resources decrease and we need of renewable materials). Wood is a versatile material which is renewable and can be used from construction, furniture to pulp and composite material, with a final recycling in energy. This cascading use of wood products enables a low carbon production of materials and energy, particularly effective for new challenges in bioeconomy. To address this joint challenge of stronger and differentiated demands on wood resource and threats and constraints on the forest, some innovations and research of the public forest service are presented in this paper. The diversity of solutions (in harvesting, silvicultural treatment, species, soil monitoring...) underlines the potential of innovations in forest management and the need to mix and transfer them.