

t RenDez-Vous e c h n i q u e s

n° 50 – hiver 2016

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable

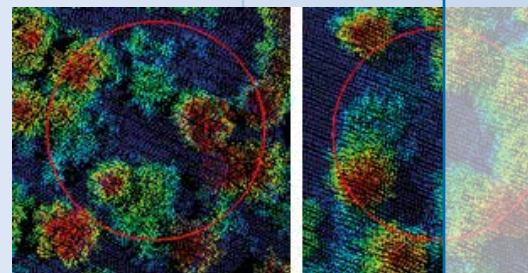


Le « masting » des chênes

p. 21

*Démonstrateur
« LiDAR aérien pour l'aménagement »*

Mini-dossier
p. 30



Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Jean-Marc Brézard, Bernard Gamblin, Laurence Lefèbvre, Prisca Léon, Marianne Rubio, Leslie Vey, Jean-François Dhôte, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF – Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture :

En haut : Nathalie Pétreil, ONF

En bas : ONF, pôle RDI Chambéry

Périodicité : 4 numéros ordinaires par an

(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

[http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques))

Disponibilité au numéro, abonnement

Renseignements

ONF – documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : documentalistes@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : avril 2016

sommaire

n° 50 - hiver 2016

3

Méthodes

Méthodes alternatives de contrôle de la molinie et de préparation du sol pour réussir les plantations

par Mathieu Dassot, Catherine Collet, Quentin GIRARD, Gwénaëlle Gibaud, Jérôme Piat, Léon Wehrle, Claudine Richter, Jean-Yves Fraysse

11

Pratiques

Peuplements sélectionnés français de chêne sessile et pédonculé : exploitation du potentiel de fructification

par Joël Conche

21

Connaissances

Fluctuations des glandées chez les chênes : Mieux les comprendre pour mieux gérer la régénération des chênaies

par Éliane Schermer, Vincent Boulanger, Sylvain Delzon, Sonia Said, Stefano Focardi, Benoît Guibert, Jean-Michel Gaillard, Samuel Venner

30

Mini-dossier

Démonstrateur « LiDAR aérien pour l'aménagement »

51

Pratiques

Utiliser un outil expérimental dans la gestion courante : les enclos-exclos pour évaluer l'équilibre forêt-gibier

par Vincent Boulanger

59

Fiche technique

Fiche n° 5 (réédition actualisée) – Eau – Contribuer à la protection des captages

du plan d'action environnemental ONF

éditorial

Ce numéro 50 de nos RenDez-Vous techniques s'articule autour de deux thèmes principaux, très différents mais fortement liés, l'un et l'autre, à notre cœur de métier. L'un concerne le concept de démonstrateur, assez nouveau dans les usages de la recherche-développement, en tout cas en matière forestière. L'autre porte plus classiquement sur le renouvellement des peuplements, source de questionnements multiples.

Dans le domaine des technologies avancées, le démonstrateur est une étape cruciale (et trop souvent manquante, selon l'ANR) entre recherche fondamentale ou appliquée et déploiement opérationnel. Grâce à une intense activité de recherche ces dernières années, les techniques de télédétection débouchent désormais sur des applications pertinentes pour la gestion forestière et qui entrent dans cette phase de démonstrateur. C'est pourquoi nous consacrons un mini-dossier à ce concept, illustré concrètement par l'utilisation des données du LiDAR aérien dans l'aménagement forestier. Nous aurons sans doute l'occasion d'en reparler dans de prochaines éditions.

Le renouvellement des peuplements, pour sa part, est une préoccupation ancienne et tout à fait familière. Mais les questions qu'il soulève se renouvellent sans cesse avec les évolutions du contexte socio-économique, bien sûr, mais aussi avec les changements globaux. Ainsi, les travaux de R&D se poursuivent en ce qui concerne les méthodes de préparation du sol et maîtrise de la végétation en plantation : nous avons largement évoqué le sujet dans le numéro 43 et nous y revenons ici à propos de la molinie. Cependant le changement climatique et le souci d'adaptation des forêts font aussi émerger des interrogations sur la fructification elle-même, première condition du renouvellement, que ce soit par régénération naturelle ou par plantation. En ce qui concerne le chêne, en particulier, cela nous conduit d'abord à dresser l'état des lieux de l'exploitation du potentiel de fructification dans les peuplements sélectionnés, puis à faire le point des connaissances sur les mécanismes qui sous-tendent les fluctuations des glandées (le phénomène de « masting »).

Reste enfin, pour ne pas compromettre le renouvellement des forêts, la lancinante question de l'abondance des populations d'ongulés. L'ONF déploie une nouvelle génération d'enclos-exclos dont on explique ici comment ils permettront de surveiller l'équilibre forêt-gibier.

Deux thèmes principaux, donc, mais des réflexions foisonnantes, comme toujours en forêt.

Le Directeur Forêts et Risques Naturels
Albert MAILLET

Méthodes alternatives de contrôle de la molinie et de préparation du sol pour réussir les plantations

La molinie est souvent une entrave au renouvellement des peuplements forestiers par plantation. L'emploi d'herbicide, moyen efficace et peu coûteux pour limiter son développement, fait aujourd'hui l'objet d'une réglementation d'autant plus restrictive qu'elle s'inscrit dans un objectif global de réduction de l'usage des produits agropharmaceutiques (plan Ecophyto). Des méthodes mécaniques alternatives sont actuellement testées par l'équipe MGVF de l'INRA et ses partenaires, notamment le département RDI de l'ONF. Présentation des premiers résultats.

La molinie (*Molinia caerulea*) est une graminée héliophile qui se développe sur des sols acides hydromorphes où elle forme un tapis dense de végétation (figure 1). Sa distribution géographique s'étend sur la quasi-intégralité du territoire français et, par conséquent, un grand nombre de contextes sylvicoles. Lorsqu'elle est abondante, la molinie est un obstacle majeur à la réussite des plantations. Son système racinaire forme un réseau souterrain extrêmement dense sur une profondeur d'environ 40 cm qui freine le développement racinaire des plants. De plus, par la compétition qu'elle exerce pour les ressources souterraines (eau et éléments minéraux), elle réduit fortement la survie et la croissance des jeunes plants (Gaudio 2011, Timbal *et al.* 1990). Pour assurer la réussite d'une plantation, le contrôle du développement de la molinie est nécessaire, tant que les plants ne se sont pas affranchis de cette concurrence.

L'application d'herbicides permet généralement de bien contrôler le développement des plantes indésirables. Un antigraminées sélectif des plantations forestières constitue une solution efficace et peu coûteuse pour

lutter contre la molinie. Néanmoins, les produits phytopharmaceutiques sont aujourd'hui soumis à une réglementation de plus en plus restrictive (réduction de la liste des produits autorisés en forêt, restrictions liées au plan Ecophyto). Leur utilisation sur des sols hydromorphes peut notamment présenter un risque de transfert par écoulement latéral ou ruissellement durant les périodes de saturation

en eau. Les méthodes mécaniques de préparation du sol et d'entretien traditionnellement utilisées pour le renouvellement des forêts, qui ont pour rôle de faciliter la mise en place et de « dégager » les plants de la végétation concurrente, ne permettent souvent pas d'arracher la molinie et son système racinaire dense sans retirer en même temps le sol qui l'entoure, en particulier dans les sols lourds.



Fig. 1 : molinie en milieu découvert

Équipe MGVF (INRA)

De nouvelles méthodes mécaniques de contrôle de la végétation et de préparation du sol sont actuellement expérimentées dans le cadre du projet ALTER (Alternative aux herbicides), initié en 2010. Il est coordonné par l'équipe MGVF (Mission de Gestion de la Végétation Forestière) de l'INRA de Nancy-Lorraine, en collaboration avec l'ONF, FCBA, la Compagnie des Landes et l'ARAA¹. Ces outils mécaniques innovants sont montés sur une mini-pelle dont la pression exercée sur le sol est réduite. Ce critère est d'une grande importance sur les sols hydromorphes où se développe la molinie, qui sont généralement sensibles à la compaction. Les situations étudiées dans le cadre du projet ALTER correspondent à des cas de blocage par la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) (Auzuret et al., 2013) et par la molinie.

L'efficacité du contrôle de la végétation et de la préparation du sol étant variable selon le type de station, l'essence plantée et l'itinéraire sylvicole utilisé (Wehrle 2013), les méthodes mécaniques expérimentées dans le cadre du projet ALTER sont mises en œuvre sur plusieurs sites d'étude et pour différentes essences.

Le réseau expérimental ALTER-molinie

Le réseau expérimental ALTER-molinie comporte quatre sites possédant une couverture dense et homogène de molinie correspondant à une large gamme de conditions pédo-climatiques : un site en forêt domaniale de Rennes (35), un site en forêt privée sur la commune de Solférino (40) et deux sites en forêt indivise de Haguenau (67), en parcelles P35 et P32. Sur la parcelle P32 de Haguenau, la végétation au sol comporte également de la fougère aigle, toutefois beaucoup moins abondante que la molinie. Sur chacun des quatre sites, cinq modalités de préparation du sol ont été mises en œuvre (encadré, figure 2) : TE (témoin), modalité sans préparation du sol utilisée comme référence ;

Le réseau expérimental ALTER-molinie

Le projet ALTER compte quatre sites à molinie : un en forêt domaniale de Rennes, deux en forêt indivise de Haguenau, parcelles P35 (molinie seule) et P32 (molinie >> fougère aigle), et le dernier dans une forêt privée des Landes (à Solférino).

Modalités de préparation du sol

Cinq modalités ont été mises en œuvre dans chacun des quatre sites :

- Témoin (TE) : aucun contrôle de la végétation ni préparation du sol durant toute la durée de l'expérimentation.
- Herbicide (HE) : application initiale de glyphosate (2160g/ha) avant plantation, puis applications (glyphosate et/ou anti-graminées) et interventions manuelles régulières pour maintenir un sol nu après plantation.
- Locale (LO) : modalité de référence régionale, propre à chaque site :
 - Haguenau : broyage de la molinie suivi d'un labour forestier croisé à la charrue à disques ;
 - Rennes : labour forestier au crabe ;
 - Solférino : broyage croisé de la molinie au débroussaillier landais suivi d'un labour à la charrue bi-socs.
- Scarificateur Réversible (SR) : scarification du sol jusqu'à 40 cm de profondeur sur une bande de 1,5 m de large centrée sur la ligne de plantation. Aucun dégageage pendant 4 ans.
- Scarificateur Réversible + Sous-Soleur Multifonction (SR+SSMF) : même travail que SR, puis passage du Sous-Soleur Multifonction pour travailler le sol jusqu'à 60 cm de profondeur et créer un billon sur lequel les arbres sont plantés. Aucun dégageage pendant 4 ans.











Plantation et zones de mesure

Les quatre sites ont été plantés en chêne et en pin, l'espèce étant variable selon le site en fonction de sa compatibilité avec la station :

- Haguenau (2 sites) : pin sylvestre (1-0, godet 400 cm³) planté en novembre 2011 ; 1^{re} plantation de chêne sessile (1S1, racines nues) en novembre 2011 ; 2^e plantation de chêne sessile (1S1, racines nues) dans les modalités SR+SSMF en décembre 2012, suite à une mortalité importante, avec installation d'une nouvelle modalité HE (nommée HE2) servant de référence. Chacun des deux sites (P32 et P35) est planté en chêne et en pin
- Rennes : pin sylvestre (1-0, godet 220 cm³) et chêne sessile (1S1, racines nues) plantés en mars 2012.
- Solférino : 1^{re} plantation de pin maritime (1-0, godet 100 cm³) en avril 2012 ; 1^{re} plantation de chêne pédonculé (1S1, racines nues) en février 2012 ; 2^e plantation de pin maritime (1-0, conteneur 110 cm³) en décembre 2012 ; 2^e plantation de chêne pédonculé (1S1, racines nues) en décembre 2012, suite à une mortalité importante.

Chaque modalité a été répétée deux à trois fois par site, sur des placettes unitaires de 13 ares (19 pour la modalité SR+SSMF), plantées à moitié en chêne et à moitié en pin. Chaque placette unitaire est constituée d'une zone de mesure comportant une centaine de plants de chaque essence et d'une zone tampon entourant la zone de mesure. Des placeaux permanents de 1 m² ont également été installés sur les lignes de plantation afin de réaliser des inventaires floristiques annuels et ainsi de suivre la recolonisation de la végétation.

¹ Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Outil utilisé	Etat du sol après intervention	Etat du sol 1 an après intervention
<i>Modalité Témoin (TE)</i>		
<i>Modalité Sol nu (HE)</i>		
<i>Modalité Locale (LO)</i>		
<i>Modalité Scarificateur réversible (SR)</i>		
<i>Modalité Scarificateur réversible + Sous-soleur multifonction (SR+SSMF)</i>		

Équipe MGVF (INRA) et ONF

Fig. 2 : modalités mises en œuvre sur les sites

HE (herbicide/sol nu), qui correspond à l'élimination de la molinie et au maintien d'un sol nu par l'application régulière d'herbicides; LO (locale), qui correspond à la préparation du sol par une technique régionale usuelle; SR (scarificateur réversible[®]), qui correspond à la scarification du sol; et enfin SR+SSMF (scarificateur réversible[®] + sous-soleur multifonction[®]), qui correspond au décompactage du sol sur 60 cm de profondeur après passage préliminaire du scarificateur réversible². Cette technique, appelée « 3B » (Wehrlen 2009), correspond à un sous-solage-billonnage qui permet d'installer les plants sur une ligne de plantation surélevée de 20 cm, à l'abri de l'engorgement et dans un volume facilement prospectable par les racines plus important. Sur chaque site, chaque modalité est répétée deux ou trois fois, en placettes unitaires de 13 à 19 ares selon le dispositif.

Les quatre sites ont été plantés en chêne (sessile ou pédonculé) et en pin (sylvestre ou maritime) durant l'hiver 2011-2012, l'espèce variant selon le site (encadré). La survie, la hauteur totale et le diamètre au collet des plants ont été mesurés chaque année. De même, des inventaires floristiques annuels réalisés sur la ligne de plantation ont permis de suivre la recolonisation de la végétation.

Les méthodes alternatives offrent un contrôle plus efficace de la molinie pendant au moins 3 ans

Quels que soient le site et le type de préparation du sol, la végétation recolonise progressivement les lignes de plantation (figure 3). Toutefois, le recouvrement de la végétation est toujours plus faible dans les modalités SR et SR+SSMF que dans la modalité LO. Trois années après traitement, le recouvrement moyen sur les quatre sites est ainsi de 37 % dans la modalité SR+SSMF et de 65 % dans la modalité SR, tandis qu'il est de 100 % dans la modalité LO.

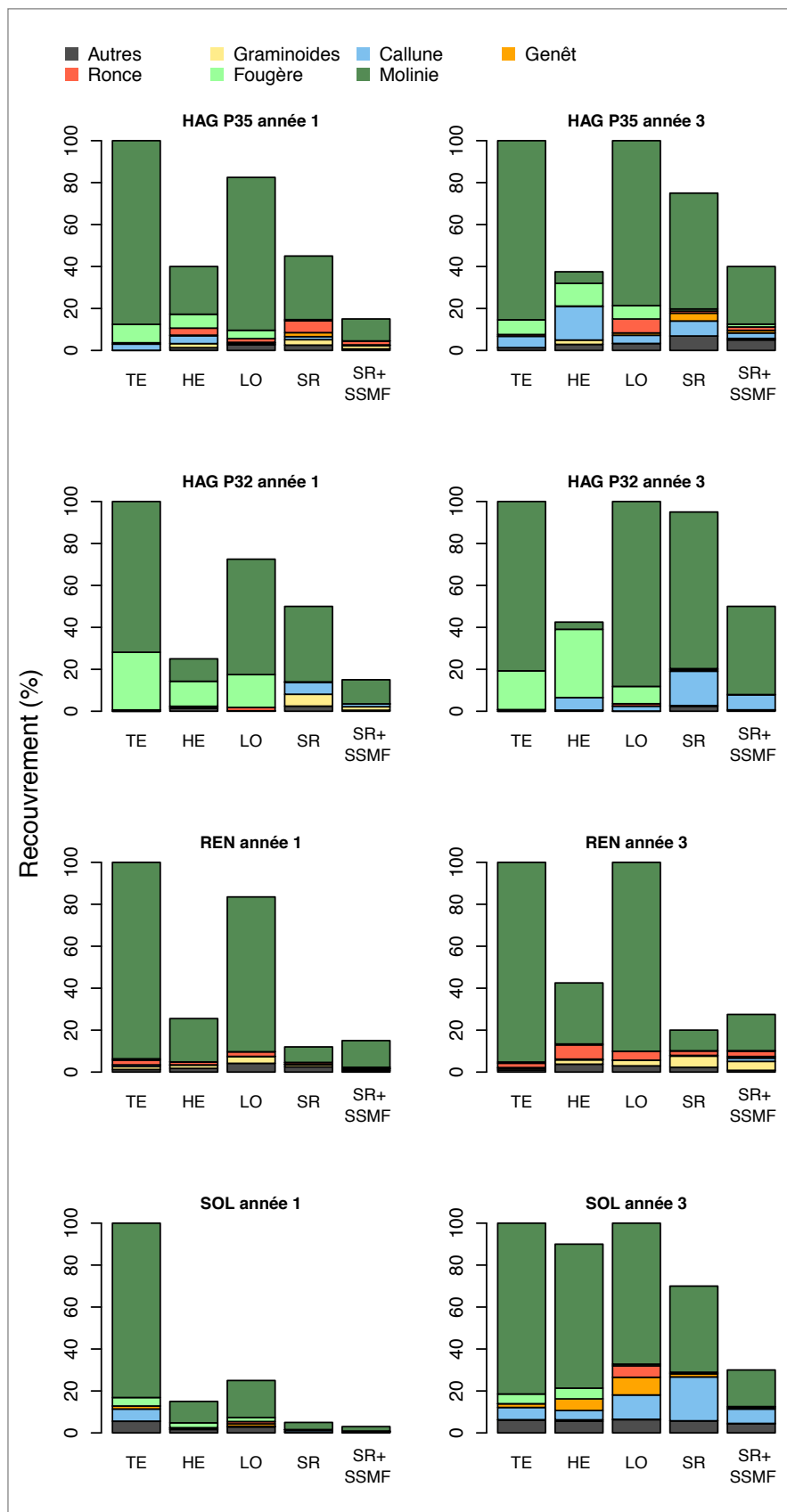


Fig. 3 : recouvrement médian de la végétation dans chaque modalité pour les 4 sites, un an et trois ans après intervention. Le recouvrement est divisé selon la contribution des différents types de végétation présents

² Les fiches techniques des différents outils sont téléchargeables sur le site web de l'équipe MGVF

La composition floristique, quant à elle, n'est que légèrement affectée par les différentes méthodes de préparation du sol durant les trois premières années. Quelle que soit la modalité, la végétation qui recolonise le sol reste toujours majoritairement composée de molinie. Toutefois, les modalités SR et SR+SSMF présentent globalement une plus forte diversification de la composition spécifique, signe d'un recul de la domination de la molinie, et permettent d'éradiquer complètement la fougère, initialement présente sur les deux sites de Haguenau. On note, pour ces deux modalités, l'apparition de callune en quantité non négligeable à Haguenau et à Solférino, espèce qui pourrait se révéler bloquante pour l'installation des plants si elle devenait plus abondante.

Une survie des plants variable selon le contexte

En février 2012, quelques semaines après la plantation, un froid intense a entraîné une forte mortalité des chênes dans la modalité SR+SSMF des deux sites de Haguenau (20-40 % de survie). Le travail du sol correspondant à cette modalité a certainement augmenté la sensibilité des plants au froid, qui n'ont pas pu débourrer au printemps. Des facteurs autres que le seul travail du sol (qualité des plants, conditions climatiques...) sont donc à considérer pour assurer une bonne reprise. Les chênes de la modalité SR+SSMF de Haguenau ont donc été replantés l'hiver suivant, conjointement à l'installation d'une nouvelle modalité herbicide/sol nu (HE2) servant de référence. Seuls ces arbres replantés seront considérés dans la suite de cette étude.

Trois années après plantation, les taux de survie observés pour le chêne diffèrent d'un site à l'autre. Sur les deux sites de Haguenau, les taux sont acceptables (plus de 80 %), avec un léger avantage pour la modalité SR. En revanche, les modalités SR+SSMF et HE2 (replantées un an plus tard, donc

décalées d'une année par rapport aux autres modalités) ont connu une première année plus délicate, sans que la cause de cette mortalité plus forte puisse être identifiée (figure 4). Sur le site de Rennes, en revanche, c'est la modalité SR+SSMF qui présente le meilleur taux de survie des chênes après trois ans (95 %!), loin devant les modalités TE, LO et HE (65-70 %) et la modalité SR (60 %). Ce très faible taux de survie pour la modalité SR s'explique par l'engorgement temporaire encore plus prononcé sur ce site : pendant 8 à 9 mois par an, l'eau stagne dans les « cuvettes » créées par l'outil et provoque l'engorgement des racines des plants. L'importance de cette contrainte traduit bien l'intérêt de la modalité SR+SSMF sur ce type de station. Ces taux de survie, prometteurs, peuvent toutefois encore évoluer.

Il est par ailleurs important de noter qu'à Haguenau les modalités HE et

LO présentent des taux de survie pour le chêne légèrement inférieurs à ceux de la modalité TE. Le maintien d'une végétation abondante pourrait-il, dans certains cas, réduire la contrainte hydrique subie par les chênes en « épongeant » plus rapidement l'excès d'eau dans le sol ? Le dispositif expérimental actuel ne permettra malheureusement pas de répondre à cette question.

D'une manière générale, la survie des pins est supérieure à celle des chênes. Trois années après plantation, le taux de survie des pins à Haguenau et à Rennes se situe entre 90 et 99 %, toutes modalités confondues (excepté TE), la modalité SR+SSMF présentant systématiquement les meilleurs taux (de 97 à 99 %). La survie des pins dans les modalités SR (ennoyées), LO et HE, légèrement inférieure, reste toutefois excellente (plus de 90 %).

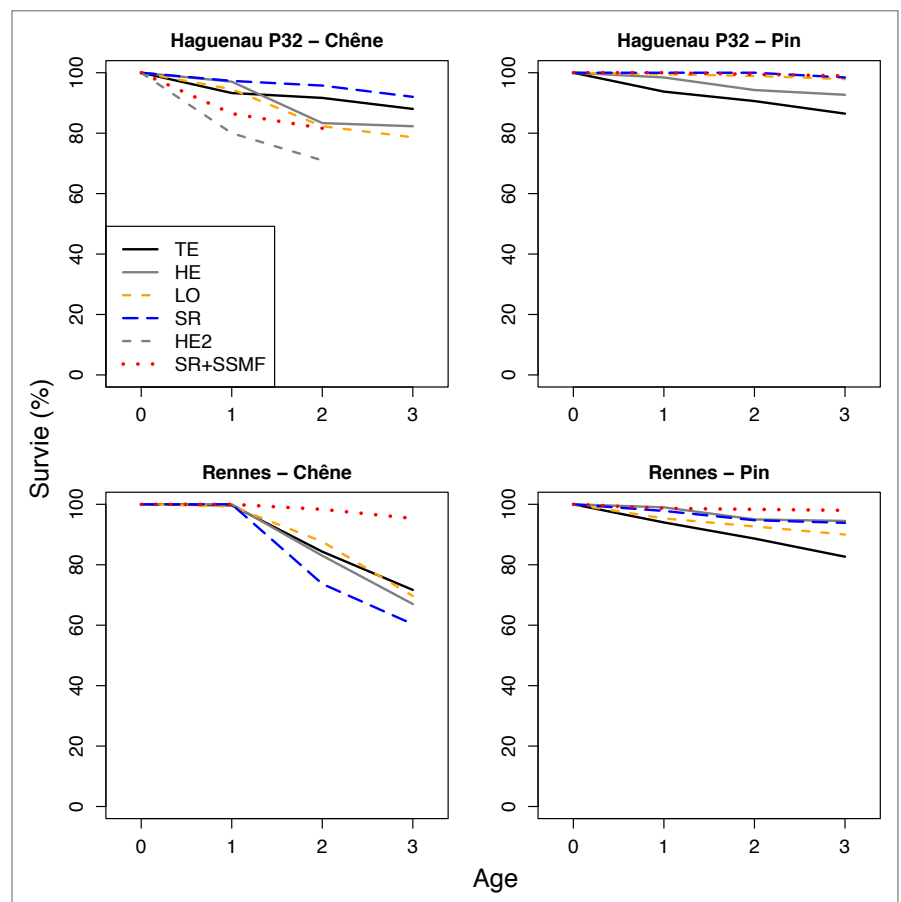


Fig. 4 : évolution des taux de survie des chênes et des pins dans chaque modalité sur les sites de Haguenau P32 et Rennes

Une croissance des plants variable selon l'essence

Les chênes ne connaissent presque aucune croissance durant les trois années qui suivent la plantation, ni en hauteur, ni en diamètre. Sur tous les sites, le diamètre moyen des chênes stagne, entre 7 et 10 mm (figure 5 gauche, exemple de Rennes). La hauteur après trois ans sur les sites de Haguenau stagne aux alentours de 70 cm (données non présentées). La hauteur des chênes à Rennes, quant à elle, diminue durant les trois années (du fait des descentes de cime), plus fortement encore dans la modalité SR, où les chênes voient leurs racines ennoyées (figure 5 droite). Sur ce type de station à molinie très contraignante, on peut se poser la question de l'adaptation du chêne et de la réussite de son implantation avec les méthodes classiques.

Ces descentes de cime semblent moins fréquentes pour la modalité SR+SSMF. Bien que, comme pour les autres modalités, on n'observe pour le moment aucune croissance en hauteur des chênes, cette technique démontre son potentiel sur des sols très engorgés. Ces descentes de cime sont suivies par l'apparition de tiges relais (rejets) et sont principalement observées sur les jeunes chênes tant que le système racinaire n'est pas suffisamment développé et que les nouvelles tiges ne sont pas assez vigoureuses.

Des tendances plus claires apparaissent en revanche pour les pins. Quel que soit le site, les croissances en diamètre et en hauteur démarrent dès la plantation (figure 6). Trois ans après plantation, la modalité HE présente les diamètres les plus importants sur tous les sites, suivie par la modalité SR+SSMF. Les modalités LO et SR arrivent ensuite, juste avant TE. Les diamètres peuvent toutefois être similaires entre les modalités SR et TE (Haguenau P35 et Rennes). Ces premiers résultats montrent que la croissance initiale en diamètre sur ce type de station dépend en premier

lieu de la réussite de la gestion de la végétation concurrente plutôt que de la manière dont le sol est travaillé. C'est essentiellement la présence de la molinie qui semble limiter l'installation des racines et l'accès des plants aux ressources du sol.

La hauteur des pins est légèrement supérieure dans les modalités avec intervention, la différence n'étant cependant pas significative. Seule exception : la modalité SR, où la croissance en hauteur peut être similaire à celle de la modalité TE (site de Haguenau P35), voire inférieure (Rennes). Ces résultats démontrent que la méthode SR seule est moins adaptée à ce type de station.

Un réel apport du sous-soleur multifonction... mais un coût initial à ne pas négliger

Sur un site extrêmement contraignant comme celui de Rennes, le scarificateur réversible utilisé seul ne favorise ni la survie des plants, ni leur croissance. Son utilisation entraîne la formation de cuvettes où l'eau stagne, ce qui provoque l'ennoyage des racines des plants (figure 7 centre). Le billon créé suite au passage additionnel du sous-soleur multifonction permet en revanche de surélever les plants et de canaliser l'eau sur les côtés, ce qui les protège de l'ennoyage temporaire classiquement rencontré sur ce type de station (figure 7 droite).

Ce phénomène est responsable des excellents taux de survie observés, notamment pour les chênes. Un volume de sol prospectable plus important est également créé, ce qui améliore leur croissance. Le suivi des plants sur les prochaines années permettra de déterminer si les effets bénéfiques observés justifient le surcoût dû à l'utilisation combinée de ces deux outils par rapport aux techniques utilisées localement. En effet, utilisé seul, le sous-soleur multifonction ne constituerait pas une solution efficace pour se débarrasser

de la molinie. Le passage préliminaire d'un outil de désherbage reste indispensable, ce qui augmente le coût de mise en œuvre.

Afin d'atténuer les effets de rétention d'eau engendrés par l'utilisation du scarificateur, d'autres outils pourraient être utilisés préalablement au sous-soleur pour contrôler la molinie. C'est notamment le cas du Razherb®, un outil dont la mise en œuvre est plus rapide et qui permet d'arser la végétation herbacée aérienne et ses racines superficielles. Par ailleurs, afin de pallier l'inconvénient du coût de mise en œuvre du sous-soleur sur mini-pelle (actuellement entre 1,25 et 1,55 € par mètre linéaire pour un travail par bandes), un outil tracté permettant de réaliser plus rapidement un travail du sol proche est également en cours d'expérimentation : le Culti3B® (Ulrich et al., 2014). Les outils Razherb® et Culti3B® sont actuellement expérimentés dans le cadre du projet PILOTE³.

Travail du sol : indispensable ?

Dans cette étude, le maintien d'un sol nu grâce au glyphosate et à des interventions manuelles régulières a permis d'obtenir les meilleurs résultats en terme de croissance des plants de pin sylvestre. Ces résultats, surprenants, montrent que la croissance de cette espèce sur ce type de station dépend au premier ordre de la végétation concurrente plutôt que de la manière dont le sol est travaillé. Que le sol soit décompacté ou non, c'est essentiellement la présence de la molinie qui semble limiter l'installation des racines et l'accès des plants aux ressources du sol. Un tel « itinéraire technique » est toutefois exclu, puisque l'enjeu est justement de réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. De plus, il n'améliore pas la survie des plants, dans la mesure où il n'empêche pas l'ennoyage de leur racines sur ce type de station hydromorphe (figure 7 gauche).

³ Descriptif du projet PILOTE et fiches techniques des outils disponibles sur le site web de l'équipe MGVF

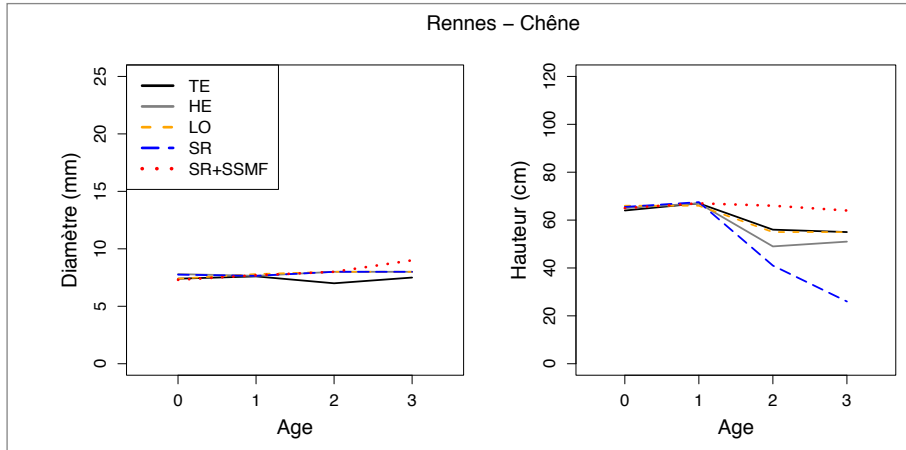


Fig. 5 : croissance en diamètre et en hauteur des chênes à Rennes, dans chaque modalité

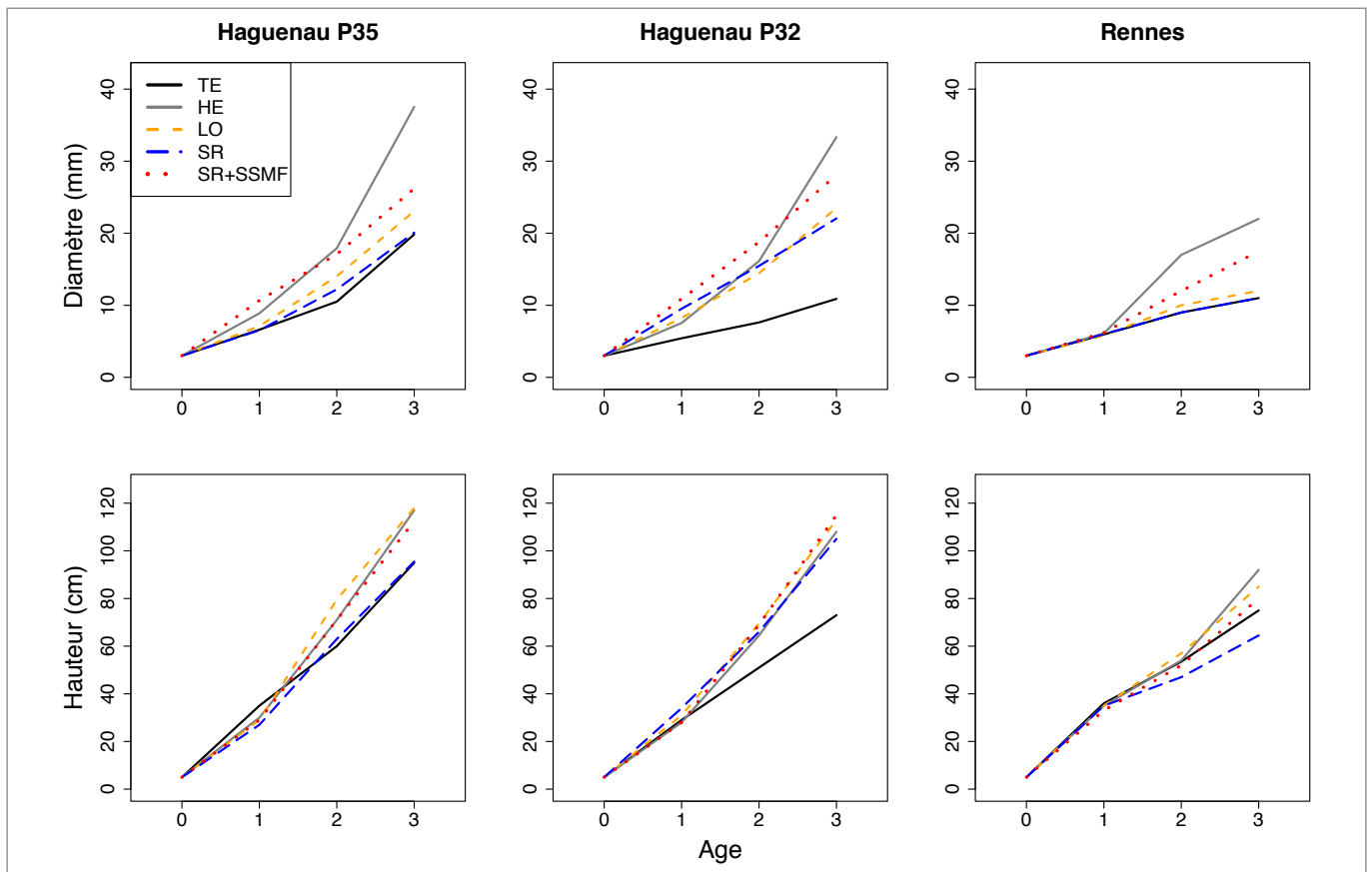


Fig. 6 : croissance en diamètre et en hauteur des pins à Haguenu P35, Haguenu P32 et Rennes, dans chaque modalité



Fig. 7 : aspect du sol après précipitations dans les modalités HE (à gauche), SR (au centre) et SR+SSMF (à droite)

Pour éviter les effets de rétention d'eau observés avec le scarificateur, d'autres outils pourraient être utilisés préalablement au sous-soleur; notamment le Razherb®, un outil dont la mise en œuvre est plus rapide et qui permet d'araser la végétation herbacée aérienne et ses racines superficielles. Par ailleurs, afin de pallier l'inconvénient du coût de la mini-pelle embarquant le sous-soleur, un outil tracté permettant de réaliser un travail du sol similaire plus rapidement est également en cours d'expérimentation : le culti3B® (Ulrich *et al.*, 2014). Ces deux outils sont actuellement en test dans le cadre du projet PILOTE⁴, également animé par l'équipe MGVF.

Conclusion

Cette étude montre que le travail du sol est indispensable pour assurer une installation rapide des plants et la réussite des reboisements sur ce type de stations hydromorphes, aussi bien pour les pins que pour les chênes. L'utilisation combinée du scarificateur réversible et du sous-soleur multifonction, qui permet de réaliser un sous-solage-billonnage (technique « 3B »), semble être particulièrement adaptée à ce contexte. Elle permet à la fois de contrôler la recolonisation de la molinie et la compétition qu'elle exerce sur les plants, d'installer les plants hors de l'eau durant les premières années et d'améliorer leur croissance.

Mathieu DASSOT^a
Catherine COLLET^b
Quentin GIRARD^c
Gwénaëlle GIBAUD^{c,d}
Jérôme PIAT^c
Léon WEHRLÉN^b
Claudine RICHTER^c
Jean-Yves FRAYSSE^e

Remerciements

Les auteurs remercient Erwin Thirion, Florian Vast et Lindsay Godard (INRA) et les membres du pôle RD&I de Boigny (ONF) pour l'installation et le suivi des expérimentations, ainsi que Fabien Duez et Xavier Auzuret pour leur participation au travail de terrain. Ils remercient également les agents locaux de l'agence territoriale ONF de Bretagne, ainsi que la Compagnie des Landes (40) qui a mis à disposition pour l'expérimentation deux parcelles forestières. Le projet a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF, conventions E30/07, E13/2010, E16/2011, E21/2013), de l'Office National des Forêts (ONF, Conventions cadre de R&D ONF-INRA en 2007 et 2010) et de la région Alsace (convention 871-10-C1).

Bibliographie

Auzuret X., Gibaud G., Piat J., Collet C., Wehrlen L., Richter C., Girard Q., Fraysse J. Y., 2014. Contrôler la fougère aigle sans asulame : quelles méthodes alternatives pour réussir les plantations? *Rendez-Vous Techniques* n° 43, pp. 22-32

Gaudio N., Balandier P., Philippe G., Dumas Y., Jean F., Ginisty C., 2011. Light-mediated influence of three understorey species (*Calluna vulgaris*, *Pteridium aquilinum*, *Molinia caerulea*) on the growth of *Pinus sylvestris* seedlings. *European Journal of Forest Research* vo. 130, pp. 77-89

Timbal J., Gelpe J., Garbaye J., 1990. Étude préliminaire sur l'effet dépressif de la molinie (*Molinia caerulea*) sur la croissance et l'état mycorhizien de semis de chêne rouge (*Quercus rubra*). *Annales des sciences forestières* vol. 21, pp. 643-649

Ulrich E., Becker C., Franco J.P., 2014. Préparer le sol avant plantation selon la technique « 3B » avec tracteur et l'outil Culti 3B® – Validation des chantiers test. *Rendez-Vous Techniques* n° 43, pp. 11-21

Wehrlen L., 2013. Quels outils pour mieux maîtriser la végétation forestière concurrente? *Forêt Wallonne* n° 122, pp. 22-35

Wehrlen L., 2009. Mieux planter ! La technique « 3B » élimine la végétation et décompacte le sol en une seule opération. *Rendez-Vous Techniques* n° 25, pp. 7-12

^a EcoSustain, Bureau d'études en Environnement, Recherche et Développement, 31 rue de Volmerange, 57330 Kanfen

^b INRA, UMR1092 LERFoB, Champenoux (54280) prenom.nom@nancy.inra.fr

^c ONF, Département RDI, prenom.nom@onf.fr

^d ONF, UT de Modane (Savoie)

^e FCBA, Pôle Biotechnologies et Sylviculture Avancée, Cestas-Pierroton (33610), prenom.nom@fcba.fr

⁴ Le descriptif du projet PILOTE et les fiches techniques des outils sont disponibles sur le site web de l'équipe MGVF

Peuplements sélectionnés français de chêne sessile et pédonculé : exploitation du potentiel de fructification

La question du renouvellement des chênaies est capitale pour la forêt française, notamment en forêt publique. Même si on privilégie la régénération naturelle, le recours à la plantation est souvent nécessaire et devrait s'accroître avec l'enjeu d'adaptation au changement climatique. Or pour planter il faut avoir récolté des glands de provenance recommandée dans des peuplements sélectionnés, selon un processus qui lui-même sera à évaluer périodiquement à l'aune de cet enjeu. Auparavant, le propos est ici de dresser le tableau de la situation actuelle.

En construisant la sécherie de graines d'arbres feuillus de la Joux en 1982, l'ONF a souhaité s'affranchir au maximum des aléas de l'approvisionnement en matériels forestiers de reproduction (MFR) feuillus, performants, adaptés et diversifiés. En corollaire, l'ONF s'est fortement impliqué dans l'activité de récolte des glands. Cette activité a été structurée grâce à un accord interprofessionnel conclu en 1990 entre le syndicat national des pépiniéristes forestiers (SNPF) et les 2 marchands français de semences d'arbres forestiers : l'ONF et Vilmorin.

On ne s'intéresse ici qu'aux semences de chêne sessile et chêne pédonculé. Sur les 20 dernières années (de 1995 à 2014), l'ONF a totalisé en ce qui les concerne une récolte de 2,2 millions de litres de glands bruts (84 % de chêne sessile et 16 % de chêne pédonculé) ce qui correspond à environ 1,8 million de litres de glands nets commercialisables soit la quantité nécessaire pour produire 90 millions de plants (l'équivalent de 60 000 ha de plantations). L'enjeu est donc très conséquent sur le plan national, mais aussi pour l'établissement car pour l'ensemble de la forêt publique, 42 % des plants installés sont des chênes (94 % de sessiles et 6 % de pédonculés). La récolte des glands, presque toujours par ramassage manuel (95 % des cas contre 5 % pour la collecte sur filets), est le premier maillon de la chaîne de production et de distribution des MFR. Aussi, la communauté forestière est annuellement attentive à son bon déroulement car, outre l'activité économique qu'elle procure aux opérateurs (semenciers, pépiniéristes, reboiseurs), elle impacte indirectement la planification des opérations de renouvellement de la forêt. Les multiples questions qu'elle soulève peuvent être synthétisées comme suit :



Nathalie Pétreil, ONF

Récolte de glands sous peuplement sélectionné de chêne sessile en FD de Bercé

- Quelles sont les contraintes d'approvisionnement spécifiques aux MFR de chêne et comment valoriser au maximum le potentiel de glands récolté ?
- Quels sont les besoins de la filière ?
- Quels sont les facteurs déterminants qui influent sur la récolte ?
- La diversité des peuplements sélectionnés (cf. encadré page suivante) est-elle pleinement exploitée ?
- Les peuplements sélectionnés de chêne suffisent-ils à assurer la production attendue et pour quelles régions de provenance ?

L'exploitation combinée de deux sources de statistiques fiables (enquêtes annuelles d'Irstea pour le compte du ministère en charge de la forêt et données internes de l'ONF) permet une analyse rétrospective sur 20 ans (1995-2014). Cette période de référence est assez longue pour rendre compte des variations saisonnières (irrégularité des fructifications et des programmes de plantation) et dresser un bilan consistant de cette activité afin d'anticiper les pistes de progrès destinées à sécuriser l'approvisionnement en MFR de chêne pour l'avenir.

Les peuplements sélectionnés – cadre réglementaire et définition

Les chênes sessile et pédonculé font partie des espèces forestières dont le commerce des MFR (matériels forestiers de reproduction) est réglementé. La réglementation, de portée européenne, repose d'abord sur un découpage territorial en régions de provenance représentatives de la diversité des peuplements présents sur le territoire national. Sur ce fondement, le ministère chargé des forêts tient le « Registre national des matériels de base des essences forestières » (peuplements, vergers à graines, parcs de pieds-mères) qui peuvent être récoltés en vue de la commercialisation de matériels forestiers de reproduction; il s'appuie pour cela sur la Commission des ressources génétiques forestières et sur Irstea. Pour la bonne information des sylviculteurs, le registre national distingue 4 catégories :

- **testée** : pour des peuplements, vergers à graines ou cultivars dont la supériorité (par rapport à des témoins) a été démontrée pour des critères précis et pour une zone d'utilisation spécifique;
- **qualifiée** : pour des vergers à graines seulement, dont la composition à partir de matériels sélectionnés est connue mais dont la supériorité n'est pas encore évaluée;
- **sélectionnée** : pour des peuplements dont la sélection en forêt, dans la région de provenance considérée, se fait essentiellement sur la base de critères phénotypiques d'intérêt sylvicole (vigueur, forme...);

• **identifiée** : pour des sources identifiées dans la région de provenance mais n'ayant fait l'objet d'aucune sélection.

Les seules sources françaises de graines commercialisables de chêne sessile et chêne pédonculé relèvent de la catégorie sélectionnée : ce sont les peuplements sélectionnés dont il est question dans cet article (encore souvent appelés peuplements classés dès lors que la sélection est entérinée par l'inscription ou « classement » au registre national).

La définition d'un peuplement sélectionné répond à une exigence de qualité génétique : c'est une population (ensemble d'individus de même espèce ayant la capacité de s'interféconder) délimitée d'arbres, choisie pour ses qualités particulières (appréciées visuellement), homogène et comportant un nombre suffisant de semenciers pour limiter les risques d'une base génétique trop étroite. Selon cette acception, les peuplements sélectionnés sont de surface très variable, de l'échelle de la parcelle à celle d'un canton forestier.

Enfin, au-delà de l'aspect réglementation commerciale, le ministère chargé de la forêt fournit des « Conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières »* pour guider les sylviculteurs dans le choix de provenances adaptées à leur région d'utilisation.

* à consulter sur : <http://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-utilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>

Les difficultés inhérentes à l'approvisionnement en MFR de chêne

La capacité de conservation des glands est limitée

Contrairement à celles des autres espèces forestières produites en sécherie, la durée de conservation des semences de chênes est physiologiquement limitée à un hiver, ou exceptionnellement deux hivers, ce qui réduit drastiquement les possibilités de stockage. Afin d'assurer l'approvisionnement régulier des pépiniéristes, l'effort de récolte des glands est donc reconduit quasiment chaque année lorsque la fructification le permet.

Cependant, il est possible de prolonger la valorisation de la récolte, c'est-à-dire étaler la production de plants, en variant les itinéraires de culture comme le montre la figure 1. Mais le choix de ces itinéraires « prolongés » a des impacts non négligeables sur le coût de production, le risque commercial et sur la conformation des plants élevés.

L'estimation de la fructification des chênes n'est fiable qu'en septembre !

Même si un faisceau d'indices (fleuraison, observation des branches de lisières ou tombées au sol, silhouette des arbres) apporte les premières tendances, il faut attendre début septembre pour quantifier l'estimation de la fructification du chêne sessile. Cela ne laisse qu'un mois avant le démarrage de la récolte et complique par conséquent la logistique des chantiers à organiser. Cette information tardive est aussi une source de difficulté pour les pépiniéristes qui doivent préparer leurs terrains et planifier leur production.

En outre, l'estimation de la fructification n'est pas une science exacte et les indications sont souvent entachées de beaucoup d'imprécisions, notamment en cas de glandée irrégulière. Cela n'est pas très grave dans la mesure où l'observation au sol des premières



Mesure de la récolte au décalitre et conditionnement en sacs dûment étiquetés pour la traçabilité



Nathalie Pétreil, ONF

chutes de glands permet toujours, même dans l'urgence, d'organiser des chantiers sous la forme d'essais de récolte préalables en configuration logistique réduite, le temps de conforter l'estimation.

Gérer les contraintes spécifiques aux MFR de chêne : la recherche du meilleur compromis

Ces contraintes sont appréhendées différemment par le marchand de semences, le pépiniériste ou le gestionnaire forestier.

Le marchand de semences cherche à optimiser le rendement des lots collectés et à minimiser le plus possible les risques sur les produits. Ces deux objectifs ne militent pas en faveur de la conservation des glands sur deux hivers qui représente une immobilisation financière, génère des pertes de produits, occasionne des frais (conservation, tris complémentaires, multiplication des contrôles de qualité), et ne présente généralement pas de garantie de débouchés contrairement aux produits frais. La conservation des glands, difficilement valorisable

financièrement, n'est utilisée par le marchand de semences que pour tenter de valoriser les excédents de production. Insuffisamment prédictibles, ces excédents sont générés par l'hétérogénéité des rendements des lots, les engagements contractés avec les ramasseurs (lorsqu'ils sont établis sur la base d'une durée de travail) et le caractère aléatoire des débouchés d'opportunité (semis direct, exportation...). Par ailleurs, l'accord interprofessionnel dit « protocole glands » conclu entre les semenciers et les pépiniéristes, n'intègre pas la conservation des glands sur deux hivers. L'initiative de stockage sur deux hivers revient donc aux seuls marchands de semences.

Le pépiniériste vise préférentiellement la production de plants d'un an (principalement 1-0) ou de deux ans (1S1). En revanche, la production sur trois ans (1S2), pénalisante sur le plan économique, ne constitue qu'une opportunité pour étaler l'approvisionnement de la clientèle. Ces trois itinéraires de production de plants en racines nues sont étroitement

dépendants des conditions pédo-climatiques des pépinières.

Le gestionnaire forestier, enfin, recherche la régularité de son approvisionnement en plants forestiers. Pour y parvenir, il peut utiliser des plants d'un an, de deux ans, voire de trois ans. Il peut également exploiter l'éventail des régions de provenances conseillées.

L'Office national des forêts est à la fois marchand de semences, pépiniériste et gestionnaire. Il doit donc intégrer les contraintes des uns et des autres. Lorsque la fructification le permet, la sécherie de la Joux stocke sur deux hivers jusqu'à 25 000 litres de glands, destinés préférentiellement aux demandes internes ou aux clients qui s'engagent avant la mise en conservation. Idéalement, la conservation des glands sur deux hivers ainsi que la production en pépinière de plants de trois ans doivent être associées à la passation de contrats d'éducation de plants, de façon à planifier et à adapter les itinéraires de production (en sécherie et en pépinière) le plus en amont possible.

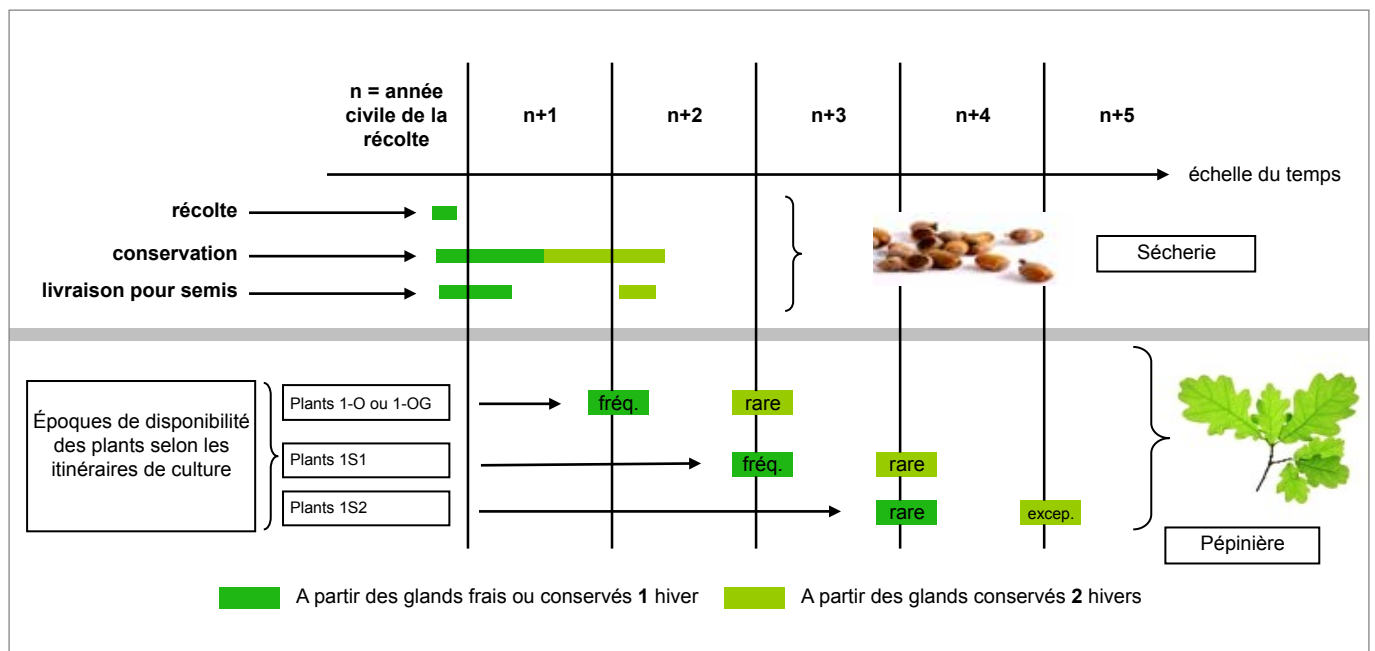


Fig.1 : étalement possible de la production de plants à partir de la récolte de glands d'une année « n »

Plants 1-0 : plants éduqués en racines nues en 1 an

Plants 1-OG : plants éduqués en conteneurs en 1 an

Plants 1S1 : plants éduqués en racines nues en 2 ans avec soulèvement intermédiaire

Plants 1S2 : plants éduqués en racines nues en 3 ans avec soulèvement(s) intermédiaire(s)

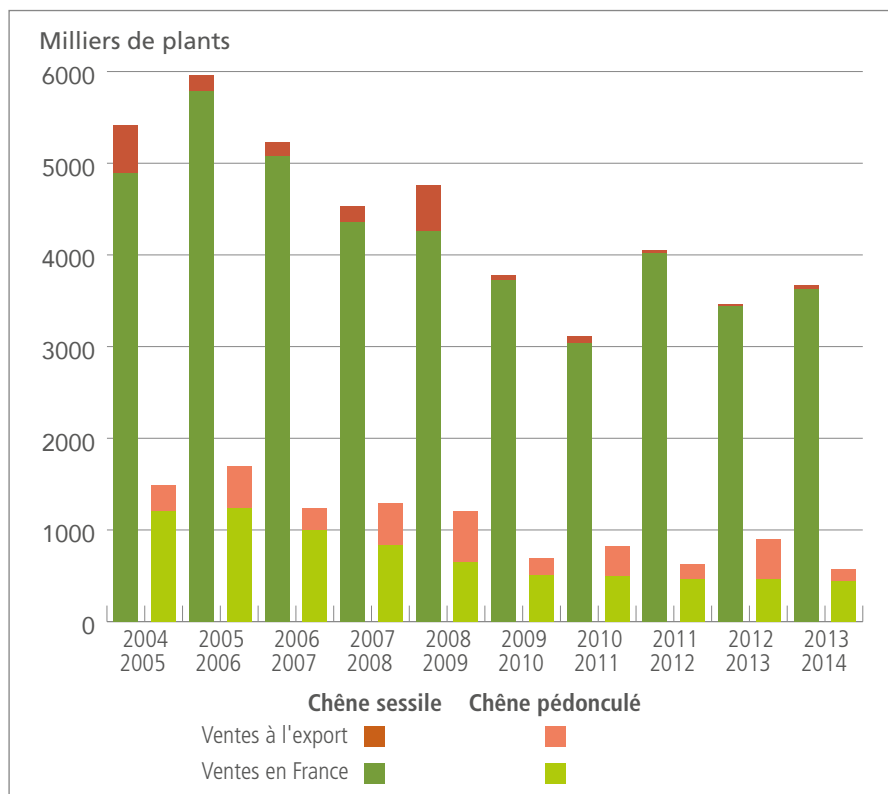


Fig. 2 : nombre de plants de chêne sessile (barres foncées) et pédonculé (barres claires) commercialisés par les pépinières françaises (Source : enquêtes annuelles MAAF- Irstea)

Quels sont les besoins de la filière ?

Les besoins annuels exprimés par la filière (figure 2) s'élevaient en moyenne (sur les 10 dernières saisons) à environ 4,4 millions de plants de chêne sessile (dont 4 % d'exportation) contre 1,1 million de plants de chêne pédonculé (dont 30 % d'exportation). Cependant, si on ne considère que la période la plus récente (les 5 dernières saisons), la tendance montre, par rapport à la situation antérieure, une érosion de la commercialisation de l'ordre de 30 % pour le chêne sessile et de 48 % pour le chêne pédonculé.

L'ONF, quant à lui, utilise en moyenne 2,2 millions de plants de chênes par an dont 94 % de chêne sessile et 6 % de chêne pédonculé. Ces besoins correspondent à 44 % de l'utilisation nationale pour le chêne sessile et 26 % pour le pédonculé (soit 13 % de la production car l'exportation représente le même pourcentage). Les plantations de chêne pédonculé ont fortement régressé au cours de ces 10 dernières années et se limitent aux stations les plus favorables à l'espèce (zones alluviales notamment).

Ces statistiques globales ne peuvent cependant être interprétées finement qu'en entrant dans le détail des régions de provenance utilisées, très souvent conformes aux recommandations nationales ou régionales. Les fluctuations annuelles de la commercialisation des plants sont certes corrélées à la demande du marché, mais dépendent aussi des pénuries conjoncturelles de glands pour certaines provenances.

Concernant la forêt publique, les besoins exprimés résultent des choix sylvicoles, lesquels dépendent en premier lieu des essences objectif (cas par exemple des substitutions d'essences dans la direction territoriale Ile-de-France – Nord-Ouest), mais aussi de la réussite de la régénération naturelle, des événements climatiques extrêmes (tempêtes), ou de la

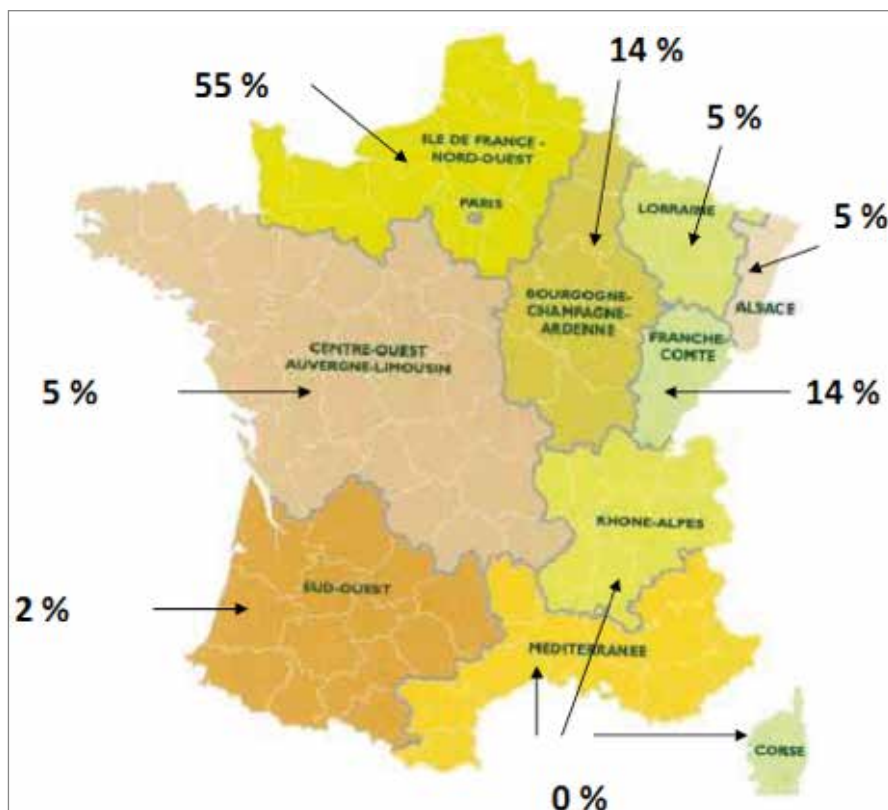


Fig. 3 : les grandes zones d'utilisation des plants de chêne en forêt publique

faisabilité des itinéraires techniques (problème du coût des protections contre les dégâts de cervidés).

Ainsi, certaines régions généreusement pourvues en peuplements sélectionnés (Grand Ouest, Centre...) sont, comme on le voit dans la figure 3, très peu utilisatrices de plants de chênes. La situation est inverse en Picardie.

Quels sont les facteurs qui influent sur la récolte des glands ?

Les caprices de la nature

Les années sans ou avec fructification alternent de façon plus ou moins irrégulière selon les provenances (tableau 1, figures 4 et 5). Ces alternances sont liées aux aléas climatiques qui peuvent affecter la floraison, la pollinisation, la fécondation ou la maturation, ainsi qu'au développement associé du cortège de prédateurs des fleurs et des graines. Globalement, la fréquence des fructifications, en particulier celle des fructifications abondantes (généreuses) qui permettent la récolte, varie géographiquement et selon l'espèce, comme on le constate en analysant des indications du tableau 1.

Pour le **chêne sessile** :

- les grandes régions de provenance de l'Ouest et du Centre (par exemple QPE 105, QPE 106, QPE 107, QPE 411) fructifient en moyenne 2 années sur 3, et quasiment 1 année sur 2 de façon généreuse ;
- les principales régions de provenance du Grand Est (par exemple QPE 203, QPE 204, QPE 205) fructifient en moyenne 1 année sur 2, et de façon généreuse 1 année sur 3 ;
- la région de provenance Picardie (QPE 102) a fructifié en moyenne 1 année sur 2 mais seulement 1 année sur 5 de façon généreuse ;
- la région de provenance Gascogne (QPE 362) n'a fructifié en moyenne qu'1 année sur 3, de façon généreuse.

Région de provenance	de 1981 à 2015 (soit 35 années), nombre d'années :			total des années de fructification ± irrégulière
	sans fructification	avec fructification insuffisante pour couvrir les besoins	avec fructification suffisante ou excédentaire	
Chêne sessile				
QPE 101 Bordure Manche (*)	5	1	5	6 (/11)
QPE 102 Picardie	18	10	7	17
QPE 103 Massif Armoricain	26	3	6	9
QPE 104 Perche	19	3	13	16
QPE 105 Sud bassin parisien	8	10	17	27
QPE 106 Secteur ligérien	12	7	16	23
QPE 107 Berry Sologne	14	4	17	21
QPE 201 Ardennes (*)	8	1	3	4 (/12)
QPE 203 – Nord-Est limons et argiles	18	7	10	17
QPE 204 Nord-Est gréseux	18	7	10	17
QPE 205 Vallée de la Saône	16	10	9	19
QPE 212 Est bassin parisien	14	8	13	21
QPE 311 Charentes-Poitou	17	5	13	18
QPE 362 Gascogne	22	3	10	13
QPE 403 – Rouergue Massif Central (*)	8	0	2	2 (/10)
QPE 411 Allier	19	2	14	16
QPE 422 Morvan Nivernais	21	5	9	14
QPE 500 Alpes et Jura (*)	5	2	2	4 (/9)
QPE 601 Pyrénées (*)	4	0 (?)	0	0 (/4)
Chêne pédonculé				
QRO 100 Nord-Ouest	14	8	13	21
QRO 201 Plateaux du Nord-Est	18	6	11	17
QRO 202 Vallée du Rhin	30	3	2	5
QRO 203 Vallée de la Saône	16	2	17	19
QRO 301 Nord de la Garonne (*)	9	1	0	1 (/9)
QRO 361 Sud-Ouest	15	13	7	20
QRO 421 Massif Central	29	5	1	6

(*) Régions de provenance créées en cours de période (référence incomplète)

Tab. 1 : caractérisation de la fructification par provenance depuis 1981

Pour le **chêne pédonculé** :

- la région de provenance Val de Saône (QRO 203) a fructifié en moyenne 1 année sur 2, de façon généreuse ;
- la fructification de la région de provenance Plateaux du Nord-Est (QRO 201) était fréquente jusqu'en 2007 ; curieusement, elle a manqué de 2008 à 2014 et il a fallu attendre 2015 pour pouvoir envisager à nouveau une récolte ;
- la fructification du Sud-Ouest (QRO 361) est fréquente, 1 année sur 2, mais de façon hétérogène.

Il est assez complexe d'appréhender le volume de glands récoltable sur un hectare de peuplement sélectionné car la récolte n'est jamais homogène au sein d'un même peuplement et il faut souvent exclure les surfaces non accessibles aux récolteurs pour des raisons diverses (parcelles en régénération, ronces ou sous-bois très dense, parties en exploitation...). Par ailleurs, les années de bonne fructification,

les marchands de semences ne prélèvent que ce dont ils ont besoin et l'estimation du potentiel global ne peut donc pas être vérifiée.

Sur les petits peuplements intégralement parcourus en récolte manuelle, il est très rare de dépasser 500 litres à l'hectare. On ne peut se faire une idée du potentiel maximum que lorsqu'on récolte exceptionnellement les glands par relevage de filets posés préalablement à l'aplomb des semenciers. Dans cette configuration, même les glands très petits sont ramassés et le volume collecté peut atteindre 1500 litres par hectare de filets étendus.

L'implication des personnels

L'ONF contribue fortement à l'approvisionnement diversifié des pépinières. Pendant les 20 années de référence (1995-2014), l'ONF a récolté respectivement 74 % et 59 % des peuplements de chêne sessile et de chêne pédonculé inscrits au registre national. Ce sont ainsi 134

peuplements de chêne sessile et 60 de chêne pédonculé qui ont été récoltés au moins une fois. Au total, 625 récoltes ont été organisées, les peuplements ayant été pour la plupart récoltés plusieurs années.

Pour le chêne sessile, le peuplement le plus « sollicité » en 20 ans est celui de Fontainebleau (77), qui a été récolté 15 fois, suivi par ordre décroissant des peuplements de Dourdan (91), Bercé (79), Longchamp (21), Sturzelbronn (57), récoltés respectivement 14 fois, 13 fois, 12 fois, 11 fois... En volume totalisé de récolte, c'est le peuplement de Dourdan qui arrive en tête avec 232 000 litres récoltés en 14 récoltes, suivi de Bercé avec 183 000 litres en 13 récoltes, et de Sturzelbronn avec 73 000 litres en 11 récoltes...

Concernant le chêne pédonculé, c'est le petit peuplement de 5 ha de la forêt d'Urt (64), qui a été récolté le plus souvent (11 fois). Le peuplement

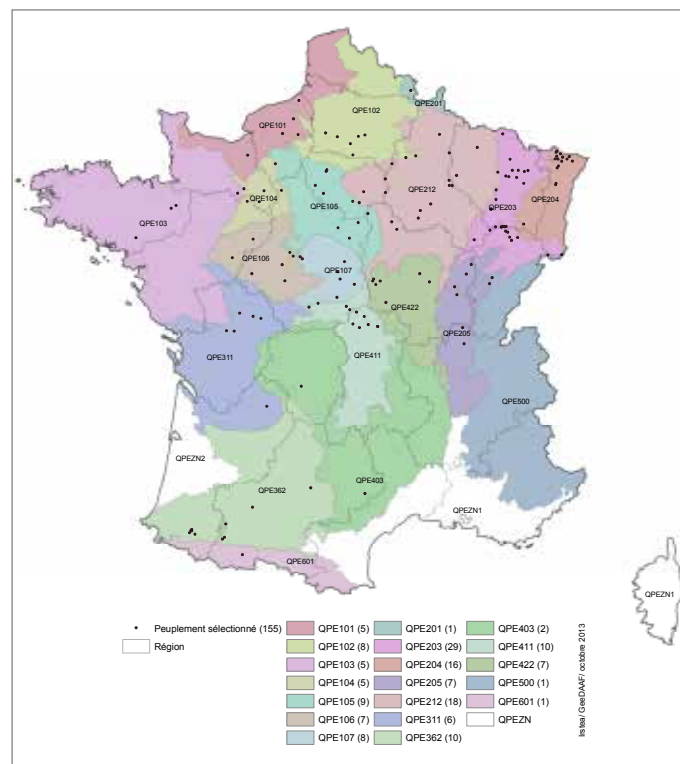


Fig. 4 : carte des régions de provenance de chêne sessile : situation octobre 2013 – source Irstea Nogent sur Vernisson

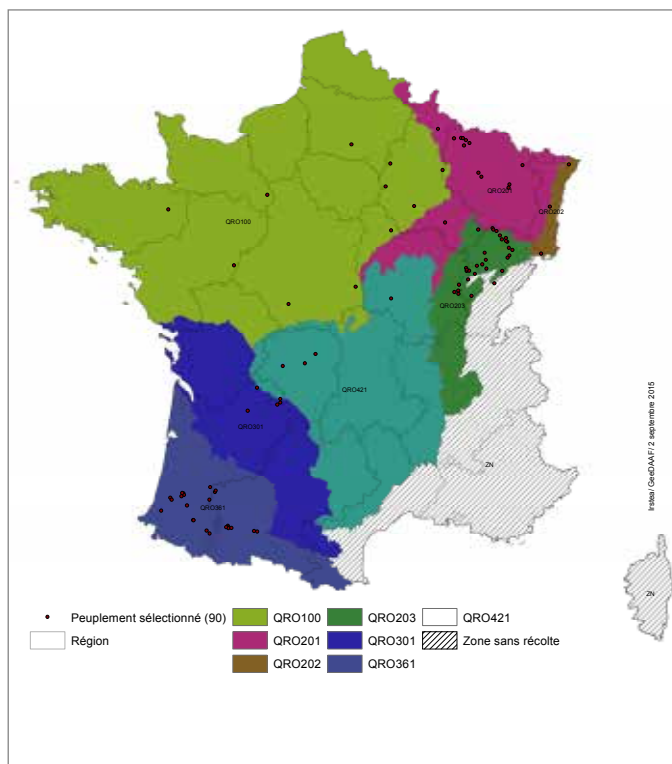


Fig. 5 : carte des régions de provenance de chêne pédonculé : situation octobre 2013 – source Irstea Nogent sur Vernisson

de Compiègne (60) détient le plus gros volume récolté avec 69 000 litres en 10 récoltes. Il est suivi par Talmay (21) avec 47 000 litres en 6 récoltes...

D'une façon générale, sur la période d'observation de 20 ans et indépendamment de l'irrégularité des fructifications, tous les peuplements les plus régulièrement et abondamment récoltés par l'ONF l'ont été grâce à l'opiniâtreté, au professionnalisme et à l'expérience d'un nombre restreint d'équipes efficaces qui sont de ce fait régulièrement sollicitées. La prudence conseillerait cependant de renouveler régulièrement les sites à récolter afin de limiter la vulnérabilité du dispositif en cas de changements de personnels.

Par ailleurs l'efficacité des équipes a ses limites en cas de faible fructification. Si opiniâtres soient-elles, et quel que soit l'effort financier consenti par le marchand de semences, il existe un seuil minimum de rendement quotidien (que l'on peut fixer à 40 litres par jour et par récolteur) en deçà duquel on ne peut plus récolter. Quand la fructification est clairsemée, les rares glands récoltables sont généralement parvenus à maturité dans des conditions limites et ils sont fortement parasités, ce qui pénalise le rendement en sécherie et restreint leur aptitude à la conservation. D'autre part, la motivation des ramasseurs s'émousse très vite car le travail devient très fastidieux lorsque les glands au sol sont trop épars.

Les récoltes explorent-elles de façon satisfaisante la diversité des peuplements ?

Par commodité, le niveau d'implication des équipes locales entre en jeu dans le choix des chantiers à programmer. Dès lors, on peut s'interroger sur le risque possible d'une restriction de la diversité issue des récoltes. L'analyse des récoltes sur les 20 années de référence dissipe ces craintes pour les raisons suivantes.

- L'ONF, pour ne parler que de lui, a quasiment récolté l'intégralité des régions de provenances à l'exception de QPE 601 et QRO 301, deux provenances de création relativement récente et pour lesquelles, au demeurant, peu de besoins ont été exprimés.
- Au sein de chaque région de provenance, les ramassages ont alterné les peuplements sélectionnés. Ainsi, 194 peuplements classés ont été récoltés au moins une fois par l'ONF pendant la période, comme on l'a vu plus haut.
- Sur chaque peuplement sélectionné, la mise en place d'une logistique de récolte suppose un minimum de volume à collecter (seuil de 200 litres environ). Aussi, en configuration classique de récolte manuelle, la contribution d'un minimum de 20 semenciers, préconisée pour maintenir la diversité génétique, est systématiquement garantie et même largement dépassée car chaque semencier

pris isolément produit rarement plus de 10 litres récoltables.

- Au sein d'un même peuplement sélectionné, ce ne sont pas nécessairement les mêmes parcelles qui sont parcourues chaque année. Certaines deviennent inaccessibles lorsque la régénération est programmée, d'autres sont radiées ou nouvellement inscrites.
- Afin de prendre en compte les facilités logistiques des uns et des autres, une forme de partage historique des sites de récoltes entre l'ONF et Vilmorin s'est instaurée au fil des ans. Au cours d'une saison de récolte, les sites de collecte des deux entreprises (au niveau région de provenance, peuplement sélectionné ou groupe de parcelles) sont distincts. Cette complémentarité enrichit la diversité en pépinière grâce aux flux d'échanges entre les marchands semenciers et les pépiniéristes.

En conséquence, même si, pour des raisons de simplification logistique, certains peuplements sont plus souvent parcourus en récolte que d'autres, la diversité de la production est largement obtenue en raison de l'alternance des fructifications qui s'exprime au niveau des peuplements sélectionnés, des parcelles et des semenciers, mais aussi grâce à la complémentarité des sites collectés par les 2 producteurs de semences.

	Nombre de peuplements		Surface (ha) de peuplements				
	TOTAL	dont forêt privée	forêt domaniale	forêt communale	autres forêts publiques	forêt privée	TOTAL
Chêne sessile QPE	168	16	9486	951	61	290	10 787
		10 %	88 %	9 %	0 %	3 %	100 %
Chêne pédonculé QRO	91	12	662	1584	0	170	2416
		13 %	27 %	65 %	0 %	7 %	100 %

Tab. 2 : répartition du nombre et des surfaces de peuplements sélectionnés par type de propriété

Le parc de peuplements sélectionnés est-il suffisant ?

Les peuplements sélectionnés de chêne sont pour l'essentiel en forêt publique

Selon l'inventaire forestier de l'IGN (mars 2013), les chênes sessile et pédonculé sont représentés sur le territoire français davantage en forêt privée (environ 75 %) qu'en forêt publique (environ 25 %) et ce taux est quasiment stable selon que l'on considère les surfaces, les volumes sur pied ou les surfaces terrières. En revanche, 97 % de la surface et 89 % du nombre de peuplements sélectionnés de chêne sont situés en forêt publique, le classement privilégiant naturellement les peuplements de futaie et de contenance suffisante (tableau 2).

En conséquence, l'ONF se doit d'être particulièrement attentif à ce que le nombre et l'extension des peuplements sélectionnés par région de provenance (tableau 3) permettent de faire face aux besoins.

Analyse par région de provenance, pour le chêne sessile

Les provenances du **Nord et Nord-Ouest** (QPE 101 - QPE 102) représentent 4 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne sessile. Ces régions de provenance sont très sollicitées en forêt publique en raison des programmes importants de plantation de la direction territoriale Ile-de-France – Nord-Ouest (substitution partielle du hêtre et du chêne pédonculé par le chêne sessile, dans une perspective d'adaptation

au changement climatique). Compte tenu des irrégularités de fructification, c'est souvent la provenance limitrophe du sud de cette zone (QPE 105) qui permet, par substitution, de couvrir les besoins. Il est important de poursuivre l'effort de sélection de nouveaux peuplements dans cette zone, surtout pour la provenance QPE 102. Cependant, la pureté spécifique des peuplements candidats au classement (présence de chênes pédonculés en mélange intime) représente un facteur limitant.

Les régions de provenances du **Grand Ouest** (QPE 103 - QPE 104 - QPE 106 - QPE 311) représentent 36 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne sessile. À l'exception de QPE 104, ces régions sont majoritairement utilisées en forêt privée. Elles permettent également d'assurer une part d'exportation, ou de se substituer à QPE 105 en cas de pénurie. Les peuplements sélectionnés, constitués majoritairement de grands massifs domaniaux (la surface moyenne pour QPE 106 est de 300 ha !), sont suffisamment calibrés.

Les provenances du **Centre** (QPE 105 - QPE 107 - QPE 411 - QPE 422) représentent 38 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne sessile. Les régions QPE 107 et 411 sont relativement peu utilisées localement, les peuplements en place n'ayant généralement aucun souci de régénération. Bien qu'hétérogène au niveau des peuplements qui la composent, la région QPE 105 est très polyvalente car son utilisation est pos-

sible en substitution à l'est par défaut de QPE 212 ou au nord par défaut de QPE 102. L'utilisation de QPE 422 se limite au Morvan Nivernais. La surface des peuplements sélectionnés permet généralement de répondre aux besoins. Cependant, il faut envisager la recherche de nouveaux peuplements en région QPE 105.

Les provenances de **l'Est** (QPE 201 - QPE 203 - QPE 204 - QPE 205 - QPE 212 - QPE 500) correspondent à 19 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne sessile. L'utilisation de QPE 500 est extrêmement confidentielle. Par ailleurs, le positionnement géographique de l'unique peuplement en extrémité nord de la région ne reflète pas sa représentativité cartographique. Les besoins pour l'ensemble des autres régions restent très soutenus quoiqu'en retrait sur le plan local pour QPE 204. Pour l'ensemble de cette zone, les peuplements sont de petite superficie (25 ha en moyenne) ce qui complexifie les récoltes, mais à contrario répartit la charge de travail. Le travail de recherche, radiation éventuelle de peuplements et de modification du parc existant doit rester continu pour cette zone.

Les provenances du **Sud-Ouest** (QPE 362 - QPE 403 - QPE 601) correspondent à 3 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne sessile. L'utilisation de ces régions de provenance reste cependant très circonscrite aux zones climatiques du sud-ouest et la surface disponible de peuplements permet de faire face à la demande.



Nathalie Pétreil, ONF

Après récolte, contrôle de la qualité des graines et tests de germination en sécherie

Région de provenance	Peuplements	
	nombre	surface (ha)
chêne sessile		
QPE101 Bordure Manche	5	67
QPE102 Picardie	8	351
QPE103 Massif armoricain	7	106
QPE104 Perche	5	1 181
QPE105 Sud Bassin parisien	12	1 502
QPE106 Secteur ligérien	7	2 096
QPE107 Berry-Sologne	8	897
QPE201 Ardennes	3	61
QPE203 Nord-Est limons et argiles	33	671
QPE204 Nord-Est gréseux	16	713
QPE205 Vallée de la Saône	7	173
QPE212 Est Bassin parisien	18	471
QPE311 Charente-Poitou	6	452
QPE362 Gascogne	10	248
QPE403 Massif central partie	2	27
QPE411 Allier	10	1 142
QPE422 Morvan-Nivernais	9	578
QPE500 Alpes et Jura	1	12
QPE601 Pyrénées	1	23
TOTAL QPE	168	10 770
chêne pédonculé		
QRO100 Nord-Ouest	12	466
QRO201 Plateaux du Nord-Est	14	479
QRO202 Vallée du Rhin	3	53
QRO203 Vallée de la Saône	30	1 073
QRO301 Nord du Bassin de la Garonne	4	6
QRO361 Sud-Ouest	23	307
QRO421 Massif central	5	31
TOTAL QRO	91	2 416

Tab.3 : répartition des peuplements sélectionnés de chêne sessile et pédonculé par région de provenance (situation fin 2014)

Analyse par région de provenance, pour le chêne pédonculé

D'une façon générale, à l'exception de QRO 202, la surface de peuplements sélectionnés de chêne pédonculé est actuellement suffisante pour couvrir les besoins car l'essentiel des admissions a été faite à une époque où l'essence était encore massivement utilisée en plantation, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui. Toutefois, l'essentiel des peuplements a été admis au registre national à la fin des années soixante-dix. Il s'agit souvent d'anciens taillis sous futaie (QRO 203) qui sont maintenant progressivement exploités et la ressource en jeunes peuplements est limitée. Pour cette raison, il faut renouveler de façon régulière le parc de peuplements sélectionnés de chêne pédonculé et pour quasiment toutes les régions de provenance.

La provenance du Nord-Ouest (QRO 100) représente 19 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne pédonculé. En raison de son étendue (de la Bretagne à l'ouest de la Meuse), cette région de provenance est souvent sollicitée et parvient à satisfaire la demande.

Les provenances de l'Est (QRO 201 - QRO 202 - QRO 203) représentent 66 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne pédonculé. La région QRO 202 ne compte actuellement que 3 peuplements (pour 53 ha); même si son utilisation est limitée à la plaine d'Alsace, cela pourrait bientôt ne pas suffire si, comme on peut l'imaginer, la plantation de chêne pédonculé se développe en substitution du frêne ravagé par *Chalara fraxinea*. Les besoins pour QRO 201 et 203 semblent stabilisés et se compensent en substitution mutuelle, notamment en l'absence de fructification constatée depuis 7 ans pour QRO 201.

Les provenances de l'Ouest (QRO 301 - QRO 361 - QRO 421) représentent 14 % de la surface de peuplements sélectionnés de chêne pédonculé. Dans les faits, seule la région QRO 361 est couramment utilisée. Elle comporte de nombreux peuplements de très petite surface.

Conclusion

L'adéquation des récoltes au regard des besoins n'est pas une chose aisée d'autant plus que la complexité de l'organisation des chantiers limite la possibilité d'ajustements, lesquels exigent une grande réactivité en fonction de l'arrivée des informations en cours de récolte. Les aléas liés aux irrégularités des fructifications des chênes conduisent inévitablement à des situations de pénurie conjoncturelles pour certaines provenances et cela devient souvent critique après deux années consécutives d'absence de fructification. Inversement, il est aussi fréquent que des excédents de stock en sécherie ou en pépinière doivent être détruits faute de débouchés.

Le marchand de semences, autant que le pépiniériste, doit planifier sa production en y intégrant une marge de sécurité évaluée au plus juste car les opportunités de récolte d'une provenance peuvent parfois attendre plusieurs années ! Afin de limiter ces effets, les contrats d'éducation de plants permettent d'optimiser avec le maximum de sécurité, autant pour le producteur que pour le gestionnaire forestier, les opportunités de collectes, en jouant sur les moyens techniques de conservation des glands et sur la possibilité de varier les itinéraires de

culture en pépinière. Cela suppose toutefois un effort d'adaptation pour le gestionnaire afin éventuellement d'anticiper ou de retarder certains chantiers.

La réussite de l'approvisionnement de la filière suppose une coordination entre les producteurs de semences, les pépiniéristes, les gestionnaires forestiers et l'administration en charge du classement des peuplements (voir encadré). C'est par exemple grâce à cette bonne articulation que les objectifs de récolte ont pu être atteints en 2014 malgré une fructification très irrégulière dans un contexte aggravé de pénurie en pépinière. Une procédure concertée d'admission et d'extension de peuplements a alors été mise en œuvre en urgence. Elle s'est focalisée sur les zones fructifères de l'année qui concernaient les régions de provenance potentiellement déficitaires. Des contrats d'éducation ont été conclus dans la foulée par les directions territoriales ONF de Franche-Comté, Lorraine, Bourgogne Champagne Ardennes, Ile de France Nord-Ouest, Sud-Ouest.

Pour autant, cette procédure d'urgence doit rester une exception : l'effort de renouvellement des peuplements sélectionnés doit être régulier mais ciblé prioritairement vers les

provenances qui le justifient. Compte tenu des enjeux pour l'établissement, il est nécessaire de sécuriser l'approvisionnement de la filière en plants de chênes performants, adaptés et diversifiés, en poursuivant les efforts visant à planifier les besoins et à optimiser les disponibilités en MFR du marché.

La mise à jour toute récente des conseils nationaux d'utilisations des MFR de chêne élargit maintenant le panel de provenances au sein des zones géographiques, ce qui permet de fluidifier davantage les productions tout en enrichissant de façon raisonnée la diversité des introductions de MFR.

Compte tenu de leur expérience passée, les marchands de semences et les pépiniéristes sont capables de faire face à un accroissement significatif de la demande si, comme on l'imagine, les stratégies d'adaptation aux changements globaux induisent des besoins accrus en plantation. Cependant, ces opérateurs ont besoin du maximum de visibilité et de régularité pour gérer leurs productions respectives dans les meilleures conditions.

Joël CONCHE
ONF, expert national
graines et plants



Nathalie Pétreil, ONF

Chaîne de traitement et conditionnement en caisses bois dûment identifiées pour conservation en sécherie

Fluctuations des glandées chez les chênes : Mieux les comprendre pour mieux gérer la régénération des chênaies

La reproduction des chênes connaît des pics de fructification massive suivis d'années maigres, et de façon remarquablement synchrone sur de grandes régions. Ce phénomène, appelé « masting », a des conséquences bien connues des forestiers sur la conduite des régénérations, les récoltes de glands, la dynamique des populations de sangliers, etc. Pour autant, les mécanismes et interactions à l'œuvre sont mal élucidés. Or il devient urgent de les comprendre pour appréhender les effets possibles du changement climatique. Cet article fait le point de la situation.

La production de fruits chez les chênes (ou glandée) est fortement variable d'une année à l'autre à l'échelle d'un massif forestier. Ce régime de fructification correspond à une tactique de reproduction appelée « masting » qui est caractérisée par des fructifications massives certaines années, suivies d'années de faibles fructifications à l'échelle d'une population (figure 1). En biologie, on entend par population un ensemble d'individus d'une même espèce inter-connectés pour la reproduction. Ici, il s'agit donc d'un ensemble d'arbres d'une même espèce à l'échelle d'un massif forestier. Le masting est aussi observé chez d'autres espèces d'arbres en milieu tempéré : chez le hêtre commun (*Fagus sylvatica*) et le pin jaune (*Pinus ponderosa*) par exemple, bien que les fluctuations inter-annuelles des fructifications soient généralement moins marquées que dans le cas des chênes. Chez les chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* et *Quercus robur*), l'occurrence des glandées massives est très incertaine et la fréquence moyenne de ces glandées massives est très variable selon les régions géographiques ; les années de fortes glandées sont par exemple plus fréquentes dans

l'Ouest que dans l'Est de la France. Si les glandées massives sont imprévisibles, ces années de fortes glandées sont généralement suivies par des années où la production de glands est faible voire quasi-nulle. Le régime de fructification chez les chênes a donc à la fois une composante imprévisible (les glandées massives) et une composante prévisible (les faibles glandées qui suivent une forte glandée). La composante imprévisible, et en particulier notre méconnaissance des conditions favorisant les fortes glandées, pose des difficultés d'anticipation et de gestion de la régénération des chênaies.

Cet article présente l'état actuel des connaissances sur les caractéristiques

générales du masting des chênes au sens large (le genre *Quercus*), en exposant ses causes évolutives et ses mécanismes, mais aussi les lacunes à combler. Véritable enjeu stratégique, la fructification des chênes fait ainsi l'objet de suivis dans le cadre d'un programme de recherche porté par l'Université de Lyon ; on évoquera succinctement les ambitions de ce programme à court et moyen termes, en apport de connaissances et développement d'outils opérationnels et prospectifs. Il s'agit notamment de mieux comprendre le mécanisme du masting chez les chênes pour tenter d'anticiper les glandées automnales dès le printemps mais aussi de prévoir le devenir du masting dans le contexte du changement climatique.

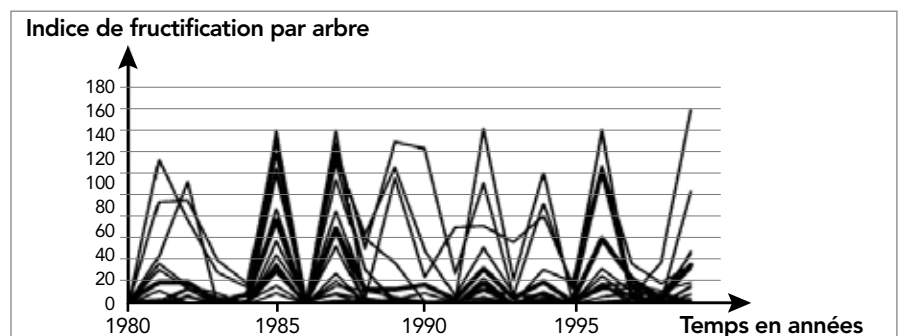


Fig. 1 : illustration du masting chez un chêne californien, le chêne de Douglas (*Quercus douglasii*) : variation de l'indice de fructification par arbre à l'échelle d'une population d'arbres (réserve naturelle de Hastings, université de Californie) en fonction du temps. Chaque ligne représente la fructification d'un individu.

1 – Comprendre le masting du chêne pour anticiper l'incidence de la maladie de Lyme ?

En 1997, R. Ostfeld émet l'hypothèse que « l'un des meilleurs prédicteurs du nombre de nymphes [de tiques] est le nombre de glands dans une zone donnée ». Si les tiques n'ont pas de lien direct avec les glands du chêne, l'abondance des glandées déterminerait les dynamiques de populations des cervidés et rongeurs, deux des hôtes majeurs des tiques, mais selon des modalités bien distinctes.

Une première étude exploratoire, basée à la fois sur des observations directes à la faveur des variations interannuelles de fructifications et sur des expérimentations d'épandage de glands, a permis de mettre en évidence que l'abondance de glands détermine l'occupation de l'espace par les cervidés. L'abondance des glands attire fortement les populations dans les chênaies les années de fortes fructifications, on y trouve alors des populations de tiques très abondantes; en revanche, en cas de faibles fructifications, Ostfeld et ses collègues constatent un délaissement des chênaies (et une forte baisse des populations de tiques) au profit d'autres peuplements, plus riches en ressources alimentaires et qui voient leurs populations de tiques augmenter. Ainsi, une abondante glandée serait liée, localement et immédiatement (l'automne même), à de fortes populations de tiques.

Par ailleurs, un épisode de fructification massive des chênes permet aux rongeurs de constituer des réserves énergétiques à l'automne et on constate au printemps un meilleur taux de survie des adultes; en outre, ces années de masting semblent être déterminantes dans la survie d'élevages hivernaux. Les fortes glandées favoriseraient donc l'augmentation du nombre d'individus au sein des populations de rongeurs au printemps qui suit. Or, ces rongeurs sont non seulement les hôtes des tiques mais aussi l'un des réservoirs les plus performants de la bactérie responsable de la maladie de Lyme (*Borrelia burgdorferi*). En 2006, ces mêmes chercheurs montrent une mécanique en deux temps : une abondante glandée à l'année n augmente les populations de rongeurs (souris et tamias striés) en

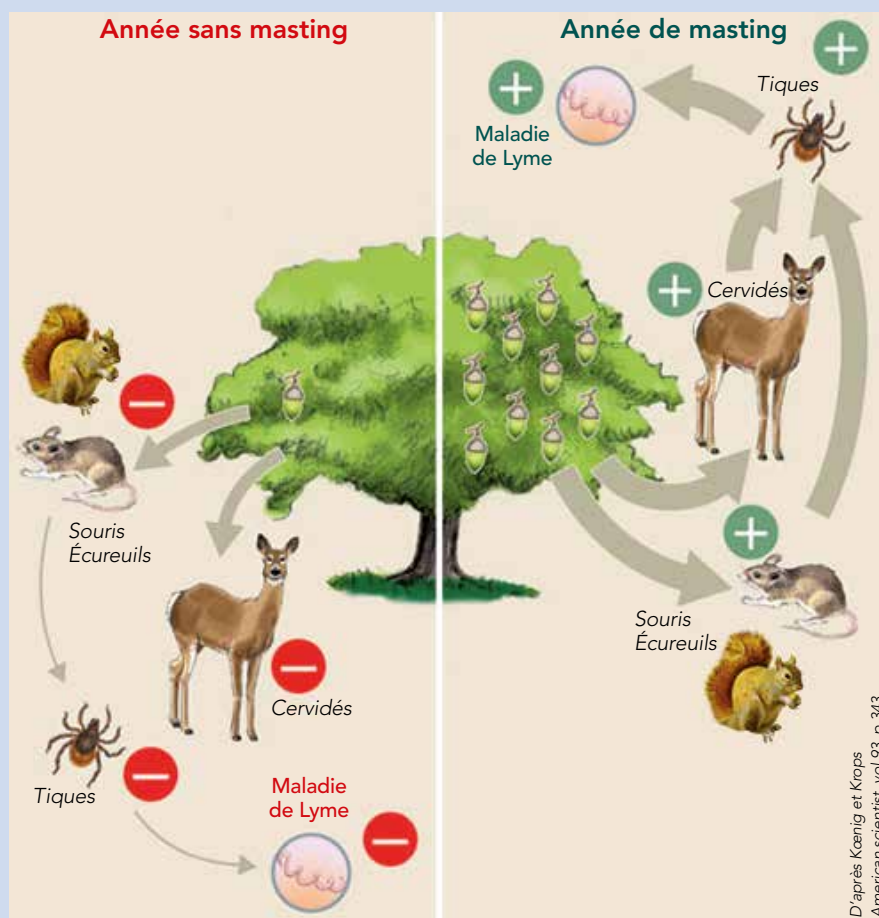
année n+1 qui élèvent alors les nymphes qui se répandent (avec leur charge en bactéries) à l'année n+2.

Il est intéressant de noter que les études récemment conduites par le Muséum d'histoire naturelle en forêt domaniale de Sénart, et toujours en cours, tendent à confirmer ces liens forts entre productions fruitière des chênes et dynamique des populations de sciuridés (écureuils et tamias de sibérie) d'une part (Le Cœur, 2015), et populations de sciuridés et maladie de Lyme d'autre part (Marsot et al., 2013, Pisanu et al., 2014).

Dans un précédent article (RdVT 41-42, 2012), nous exposons des résultats contradictoires rencontrés dans la littérature scientifique quant au rôle des cervidés dans la progression de la prévalence de la maladie de Lyme. En 2014, une équipe américaine a montré, sur la base de 13 années de suivi, que la réduction forte des populations de

cervidés a induit une diminution notable de la prévalence de la maladie de Lyme dans les populations avoisinantes. Des liens semblent donc se dessiner entre les populations de cervidés (nombre et localisation) et prévalence de la maladie de Lyme. Mais les travaux scientifiques récents n'ont pas permis de mettre en évidence un effet en cascade entre abondance des glandées, populations d'ongulés et prévalence de la maladie de Lyme (Ostfeld et al., 2006).

Si la connexion entre la maladie de Lyme et les glandées n'est pas intuitive, la compréhension des cascades écologiques permet d'établir des liens plausibles (voir schéma) entre ces deux phénomènes qui reçoivent l'attention des forestiers. Ainsi, la progression des connaissances sur les fructifications des chênes et leurs conséquences pourrait bien, à terme, permettre d'anticiper les fluctuations spatiales et interannuelles de la prévalence de la maladie de Lyme.



D'après Koenig et Klops American scientist, vol 93, p. 343

Le masting est une stratégie de lutte contre les consommateurs de glands

De nombreux facteurs peuvent affecter la survie des glands et leur pouvoir germinatif, compromettant ainsi le succès de régénération des chênaies. Par exemple, les glands peuvent être infestés par des champignons ou parasités par des larves d'insectes spécialisés, comme des coléoptères (dont on peut trouver, en France, 4 espèces différentes dans les glands d'un même arbre) ou des lépidoptères. Les glands peuvent également être consommés par de nombreuses espèces d'oiseaux et mammifères (geais des chênes, sangliers, cerfs, chevreuils, rongeurs). Pour certaines de ces espèces (sanglier par exemple), ils constituent l'essentiel de l'alimentation quand ils sont produits en abondance.

Par ailleurs, plusieurs études ont montré que le taux de survie des glands tombés au sol augmente lorsque les glandées sont massives. Ce résultat peut s'expliquer par le mécanisme de « satiation des consommateurs », selon lequel la forte variabilité des fructifications permet de contrôler la densité des consommateurs de glands. Les années de faibles glandées qui précèdent et suivent une glandée massive maintiennent les populations de consommateurs de glands à un faible effectif. En conséquence, lorsque survient une glandée massive à l'échelle d'un massif forestier, ces consommateurs de glands ne sont pas en mesure d'absorber en totalité une ressource subitement surabondante; c'est ce qu'on appelle la « satiation » des consommateurs. Le caractère rare et imprévisible des glandées massives minimise ainsi leur taux de prédation par les oiseaux et mammifères, de parasitisme par les insectes et d'infestation par les champignons. Les glands tombés au sol ont donc un taux de survie élevé, et leur germination peut produire des semis abondants. Le masting des chênes – le masting de manière générale – semble donc être une tactique de reproduction qui

permet aux arbres de maximiser leur succès reproducteur et contribue largement à la réussite de la régénération des chênaies.

Le masting est une source de contraintes pour les gestionnaires

Par le passé, les fruits des arbres forestiers, comme les châtaigniers ou les chênes, étaient une ressource capitale pour nourrir le bétail. Cependant, le phénomène du masting rendait cette ressource hasardeuse, avec parfois des conséquences désastreuses pour les paysans. Aujourd'hui, l'agriculture s'est affranchie de cette ressource, notamment en s'appuyant sur des plantes fourragères annuelles à haut rendement, et ne dépend plus directement de la fréquence de ces fortes fructifications. C'est surtout indirectement que le masting a des impacts sur des pans entiers d'activité agricole, sylvicole et sanitaire.

Pour les gestionnaires forestiers, le masting des chênes a des conséquences économiques importantes car, dans une stratégie de gestion durable, la récolte et la commercialisation des arbres sont conditionnées par le succès de régénération des peuplements. Or les capacités de régénération sont d'abord déterminées par la présence et la densité des semis, conséquence directe de l'abondance des fructifications. L'absence de glandée peut donc retarder les processus de régénération et différer la récolte jusqu'à l'obtention d'un capital de semis suffisant. La capacité de mobilisation et de récolte des semences par la filière graines et plants est elle aussi sous dépendance forte des événements de glandées abondantes qui conditionnent chaque année les provenances disponibles ainsi que la logistique et les efforts de récolte. Le masting peut aussi avoir des conséquences économiques indirectes par ses effets sur la démographie des populations de consommateurs de glands. À titre d'exemple, les fortes

glandées contribuent directement à la prise de masse des sangliers qui conditionne en cascade la fertilité des laies et la survie des marcassins. L'année qui suit une glandée massive peut alors être caractérisée à la fois par une moindre disponibilité en glands (composante *prévisible* du masting) et par une très forte densité en sangliers. Une telle concomitance engendre une situation de disette qui pourrait contraindre les sangliers à s'alimenter dans les cultures agricoles, au voisinage des chênaies, multipliant potentiellement les dégâts aux cultures. Ce scénario est l'une des explications possibles à la forte variabilité des dégâts agricoles d'une année à l'autre (autour d'un montant de 40 millions d'euros par an pour notre seul pays). Toutefois, cette relation intuitive entre glandées et dégâts aux cultures reste à démontrer. Le masting des chênes peut aussi avoir un impact important sur l'épidémiologie de certaines maladies. La dynamique des glandées peut influencer la dynamique des populations de certains consommateurs de glands (comme les rongeurs) et, indirectement, celle de leurs macro-parasites (notamment les tiques) de même que celle des maladies transmises par ces parasites. Une corrélation entre la prévalence de la maladie de Lyme et les dynamiques de rongeurs et des glandées a été mise en évidence dans certaines régions des États-Unis (Ostfeld, 1997, voir aussi encadré 1).

État actuel des connaissances sur les mécanismes du masting

Quelques éléments de biologie de la reproduction des chênes

La décomposition du cycle de reproduction des chênes est le point de départ méthodologique nécessaire pour aborder les mécanismes déterminant le masting (figure 2). Les différentes espèces de chênes sont monoïques, ce qui signifie que chaque arbre possède à la fois des fleurs mâles d'où provient le pollen

et des fleurs femelles susceptibles de se transformer en fruits après fécondation. L'initiation florale a lieu au printemps et en été de l'année $t-1$. La pollinisation se déroule tôt au printemps de l'année t , mais la fécondation est différée à l'été. Les chênes ont dressé de nombreuses barrières à l'autofécondation, limitant ainsi probablement la consanguinité et favorisant un maximum de brassage génétique.

Pour expliquer les patrons de fructifications observés, deux théories fondamentalement différentes ont été proposées. L'une est basée exclusivement sur les conditions météorologiques, l'autre sur la dynamique d'acquisition et d'allocation des ressources des arbres et la pollinisation croisée (encadré 2). À ce jour, la confrontation de ces théories aux études empiriques ne permet pas d'en donner une plus plausible que l'autre.

Sur l'importance des conditions météorologiques

Selon la première théorie du masting (encadré 2) les conditions météorologiques joueraient un rôle primordial pour expliquer les patrons de fructifications. En accord avec cette proposition, des travaux récents sur les chênes soulignent l'importance des conditions météorologiques pour expliquer la synchronisation des fructifications. Plusieurs observations montrent que des arbres soumis à des conditions météorologiques semblables présentent aussi des patrons de fructifications semblables. L'une d'elles montre que la synchronisation

des fructifications entre les arbres peut se faire à très large échelle spatiale, jusqu'à plusieurs centaines voire milliers de kilomètres chez le chêne de Douglas (*Quercus douglasii*) et le chêne blanc de Californie (*Quercus lobata*) (Koenig et Knops, 2013). La diminution de la synchronisation avec la distance, souvent décrite, s'expliquerait alors par le fait que les conditions météorologiques sont de moins en moins similaires au fur et à mesure que la distance augmente.

En outre, si les résultats convergent sur le fait que les conditions météorologiques impactent le succès de fructification, les paramètres météorologiques impliqués (type et période de l'année) diffèrent selon le lieu géographique et les espèces de chênes considérées. Il semble ainsi que la sécheresse estivale causerait un stress hydrique défavorable à la production de fruits chez les chênes de l'Amérique du Nord (Sork et al., 1993) et que des fortes précipitations annuelles de l'année en cours et/ou de l'année précédente favoriseraient la fructification chez les chênes de Californie (Koenig et al., 1996). Les conditions météorologiques interviennent aussi directement sur le processus de pollinisation. Des températures moyennes élevées en avril associées à de faibles précipitations au printemps seraient favorables à la fructification des chênes (Koenig et al., 1996; Koenig et al., 2015; Perez-Ramos et al., 2015). En effet, si la pluie tombe au moment de la diffusion pollinique, elle pourrait précipiter la grande majorité du pollen au sol, le

pollen pourrait alors devenir limitant ce qui conduirait à un échec de la pollinisation et de la fructification; à l'inverse, un temps chaud et sec serait propice à la diffusion du pollen des chênes par le vent (Kasprzyk, et al., 2014). L'impact direct des conditions météorologiques sur le processus de pollinisation et indirect sur le succès de fructification restent à établir.

Rôles respectifs de la pollinisation croisée et de l'épuisement des réserves

L'autre théorie du masting propose que le processus de pollinisation croisée constitue la force qui synchronise les fructifications (encadré 2). Les approches expérimentales *in situ* sur les chênes et les résultats obtenus à ce jour soulignent l'importance de la limitation en pollen et de la pollinisation croisée pour synchroniser la fructification chez les chênes. Des expérimentations de supplémentation en pollen ont montré chez le chêne blanc de Californie (*Quercus lobata*) que l'ajout de pollen directement sur les fleurs femelles peut augmenter la production de fruits certaines années par rapport à la pollinisation naturelle (Pearse et al., 2015). Une autre étude a montré pour cette même espèce que les arbres synchronisés pour la floraison produisent effectivement plus de fruits que ceux qui sont désynchronisés (Koenig et al., 2012). En revanche, la supplémentation en pollen n'a pas permis d'augmenter la production de fruits deux années de suite (Pearse et al., 2015). Ces résultats suggèrent que, si déterminante soit-elle, la

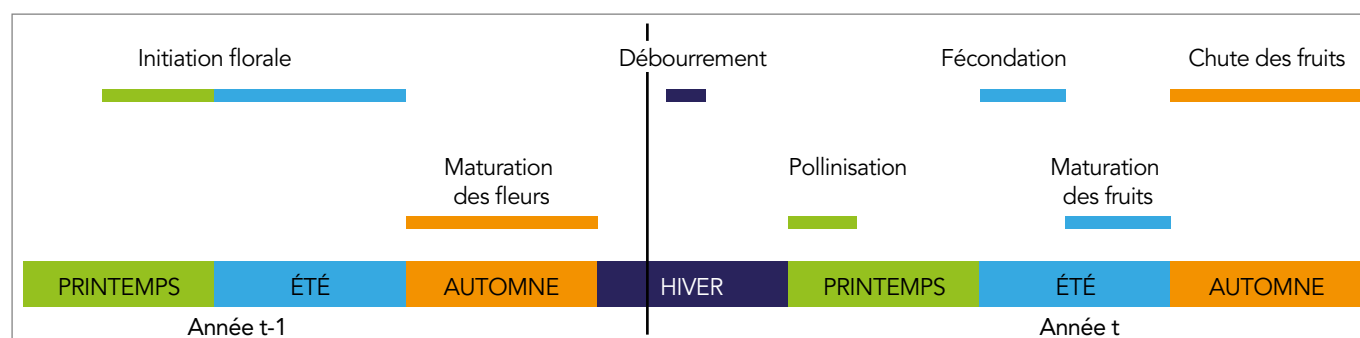


Fig. 2 : résumé des grandes étapes du cycle de reproduction des chênes

limitation en pollen n'est pas le seul facteur qui conditionne la production de fruits une année donnée; d'autres facteurs interviennent également.

L'un de ces facteurs pourrait être l'épuisement des réserves suite à la production de fruits chez les plantes pérennes. Selon cette théorie, le processus de pollinisation croisée est la force qui synchronise les fructifications, mais c'est la dynamique d'acquisition et d'allocation des ressources des arbres qui permet d'expliquer les fortes variations inter-annuelles des fructifications.

En effet, l'arbre pourrait stocker dans différents organes (racinaires, foliaires) des ressources (azotées, phosphatées, carbonées), sous forme de réserves qui peuvent s'épuiser. Cette hypothèse a été testée chez différentes espèces. Par exemple, chez le pin à écorce blanche (*Pinus albicaulis*), les concentrations foliaires en azote et phosphore ont diminué suite à la production de fruits (Sala *et al.*, 2012). Chez une Fabacée (*Astragalus scaphoides*), des expérimentations *in situ* de stérilisation des fleurs ont permis de mettre en évidence une conservation des réserves racinaires en carbone chez les individus n'ayant pas pu produire de fruits. À l'inverse, les individus ayant produit des fruits ont vu leurs réserves racinaires en carbone diminuer et ils n'ont pas fleuri l'année suivante. En outre, le blocage de la fructification une année donnée s'est accompagné d'une très forte production de fleurs l'année suivante pour les individus concernés, en décalage avec les autres plantes de la population. Ces plantes ont ensuite pu se resynchroniser lorsque le pollen n'était plus limitant (Crone *et al.*, 2009). Ce dernier résultat va dans le sens d'une action combinée du processus d'épuisement des réserves et de la pollinisation croisée. Pour les chênes cependant, ce genre de travaux sur la dynamique d'acquisition et d'allocation des ressources des arbres fait encore défaut (Kelly et Sork, 2002).

2 – Deux théories expliquent différemment le masting

La première théorie propose que les variations des fructifications sont des réponses directes aux variations des conditions météorologiques. Selon cette proposition, la synchronisation des fructifications s'expliquerait par le fait que plus les arbres sont proches géographiquement, plus ils rencontrent des conditions environnementales homogènes et plus leurs réponses à ces conditions sont similaires; c'est ce qu'on appelle l'« effet Moran ». L'effet Moran permettrait d'expliquer la synchronisation des fructifications parfois détectée à de très larges échelles spatiales pouvant aller jusqu'à des centaines de kilomètres chez le chêne blanc de Californie (*Quercus lobata*) (Koenig et Knops, 2013).

La deuxième théorie s'affranchit des variations météorologiques et explique les dynamiques de fructifications par l'action combinée des processus écophysiologiques d'acquisition de ressources par les arbres et d'allocation de ces ressources dans la reproduction (production de fleurs et de fruits) ainsi que du processus de pollinisation. Selon cette théorie, la quantité de fleurs femelles et de pollen produite annuellement dépend du niveau des réserves de l'arbre. Dans le cas de fructifications massives, l'allocation des ressources dans la fructification occasionnerait un épuisement de ses réserves et l'arbre deviendrait incapable de produire de nouvelles fleurs (et du pollen) et donc de nouveaux fruits l'année suivante. La synchronisation des arbres résulterait du fait que les arbres ne s'autofécondent pas et que leur reproduction dépend donc du pollen produit par les autres arbres de la population. Prenons l'exemple d'un arbre A désynchronisé; il produit des fleurs et du pollen alors que les autres arbres n'en produisent pas si leurs réserves sont épuisées. En conséquence les fleurs de l'arbre A ne vont pas être pollinisées, il ne va pas produire de fruits, ses réserves ne seront pas épuisées et l'année suivante il pourra de nouveau produire des fleurs, et se retrouver éventuellement en synchronie avec les autres arbres si ceux-ci ont reconstitué leurs réserves (Isagi *et al.*, 1997, Satake *et al.*, 2000, 2002a et 2002 b). Cette théorie est formalisée par des modèles mécanistes qui permettent d'examiner les différents composants individuellement (acquisition et allocation de ressources, processus de pollinisation) et la manière dont ils interagissent entre eux afin d'appréhender un phénomène globalement complexe.

Les connaissances à acquérir pour mieux comprendre le masting des chênes

Les connaissances acquises sur les processus de fructification des plantes permettent de poser des hypothèses quant au déterminisme du masting des chênes. Ces hypothèses doivent désormais être testées *in situ*. D'après les observations disponibles, on peut imaginer des modèles mécanistes plausibles mais la validation et l'affinement de ces modèles reste problématique et ils nécessitent d'être confrontés à des constats de terrain bien documentés. Or l'étude, en grandeur nature, du masting du chêne se fait généralement par l'analyse des glandées : comme une glandée implique le succès de l'ensemble des étapes du processus de fructification, cette approche ne

permet pas d'identifier les étapes critiques potentiellement sensibles aux conditions météorologiques, depuis l'initiation florale jusqu'à la maturation des fruits.

Développer de nouvelles méthodes de suivi et de modélisation

Pour mieux comprendre le masting, on a donc besoin d'analyser plus finement chacune des étapes clés du cycle de reproduction des chênes avec de nouvelles approches de terrain, utilisant les réseaux d'observation sur un large gradient environnemental pour suivre des chênes confrontés à des conditions météorologiques contrastées. Ces observations, combinées à des études écophysiologiques, alimenteront des approches de modélisation intégrant

l'ensemble des éléments clés susceptibles d'impacter la dynamique des glandées. Les modèles sont des outils puissants pour affiner la compréhension des processus, pour prévoir à court terme l'intensité des glandées et, à plus long terme, pour proposer des scénarios sur le devenir du masting dans le contexte du changement climatique. Car bien que le masting joue un rôle écologique et économique important, on n'a pas aujourd'hui les moyens de prédire si les glandées auront tendance à devenir plus fréquentes et régulières ou au contraire plus rares et imprévisibles dans le contexte du changement climatique annoncé. Dans le cas de glandées plus régulières, la densité des populations de consommateurs de glands pourrait augmenter et se stabiliser. Les chênes perdraient leur capacité de « saturation des consommateurs », ce qui pourrait compromettre la procédure de régénération forestière. À l'opposé, les fructifications massives pourraient devenir beaucoup plus rares et imprévisibles qu'elles ne le sont, occasionnant d'importantes difficultés en gestion forestière.

Mieux comprendre le masting nécessitera aussi de développer des approches expérimentales *ex situ* visant d'abord à identifier les ressources limitantes pour la reproduction (azotées, carbonées et phosphatées) et la forme de stockage (réserves). Ensuite, il s'agira d'analyser dans quelle mesure le niveau de réserves

est impacté par les conditions météorologiques, d'une part, et par le niveau des glandées des années passées, d'autre part. La manière dont l'arbre alloue ses ressources aux différents processus, tels que la croissance et la reproduction mais aussi la production de fleurs mâles et femelles, nécessite encore d'autres études. Il en va de même de l'impact des conditions météorologiques sur les processus clés de la pollinisation croisée, de la fécondation et de maturation des jeunes fruits.

Le projet « PotenChêne »

Pour contribuer à mieux comprendre le masting des chênes, un projet a été lancé dans le cadre du programme Biodiversité, Gestion Forestière, Politiques Publiques et Changements Climatiques (2014-2018) animé par le GIP-Ecofor. Ce projet s'intitule PotenChêne, « Potentiel de régénération des chênaies dans le contexte du changement climatique : Quel avenir pour le masting et les consommateurs

de glands? ». Il est coordonné par l'université de Lyon1, et engage la collaboration de trois instituts de recherche et quatre organismes publics concernés (Tableau 1).

L'objectif est d'approfondir les connaissances sur le masting des chênes et ses conséquences sur la démographie des consommateurs de glands (insectes et ongulés), et d'appréhender l'impact indirect du masting, via ces consommateurs, sur la régénération des chênaies et sur les dégâts agricoles. Le projet repose sur un réseau étendu d'observation (encadré 3; figures 3 et 4) et sur les bases de données complémentaires mises à disposition par les différents partenaires en ce qui concerne les chênes sessile pédonculé, le chêne vert, l'émission de pollen du genre *Quercus*, et la démographie des sangliers, cerfs et chevreuils. Il s'appuie aussi sur la complémentarité des compétences sur les plans scientifiques et de la gestion.

Organismes de recherche	Organismes publics de la société civile
Laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive (LBBE)/UMR CNRS 5558, Université Claude Bernard de Lyon 1	ONF (Office National des Forêts)
Laboratoire Biogeco/UMR INRA, Université de Bordeaux 2	ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage)
Centre National de Recherche Italien (Florence, Italie)	FNC (Fédération Nationale des Chasseurs)
	RNSA (Réseau National de Surveillance Aérobiologique)

Tab. 1 : organismes partenaires du projet PotenChêne



Fig. 4 : dispositif d'échantillonnage de collecte de fleurs et fruits des chênes suivis par le LBBE et l'ONF

3 – Le réseau d'observation du projet PotenChêne

Le réseau d'observation est constitué d'un grand nombre de sites répartis sur un large gradient environnemental. Seize sites forestiers de chênes sessiles, situés en plaine et répartis sur toute la France métropolitaine, permettent de suivre la floraison et la fructification des chênes ainsi que la dynamique des communautés d'insectes qui infestent les glands (suivi assuré par le LBBE et l'ONF). En plaine, un suivi standard est effectué sur 15 sites à raison de 10 arbres par site ; 12 sites correspondent à des placettes RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers) et sont complétés par 3 sites dans le sud de la France afin de constituer un gradient longitudinal (de la forêt de Rennes (35) à la forêt d'Amelécourt (57)) et deux gradients latitudinaux, l'un à l'Ouest (de la forêt de Lyons (27) à celle de Josbaig (64)) l'autre à l'Est (de la forêt d'Amelécourt à celle de Vachères (04)). Le site de La Petite Pierre (LPP) quant à lui est suivi intensivement sur 6 sous-placettes échantillonnées de la même manière (soit 60 arbres). Par ailleurs 14 sites dans les Pyrénées permettent de suivre la dynamique des fructifications sur un très large gradient altitudinal (2 « transects » altitudinaux entre 100 et 1600 m) ; leur suivi est assuré par BIOGECO. En outre, l'ONF fournit des données relatives aux glandées, quantifiées sur les sites RENECOFOR (entre 1994 et 2007), qui seront analysées en relation avec les données météorologiques (Météo France). L'ONF organise en parallèle une enquête auprès des agents forestiers pour récolter des informations relatives à l'intensité des glandées à l'échelle des massifs forestiers français sur les 30 dernières années. L'impact des conditions

météorologiques sur les profils d'émission pollinique sera analysé sur la base des données issues du Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) sur 60 sites répartis sur l'ensemble de la France.

En complément, 4 sites « Ongulés » en France, et 1 site en Italie (Castel Porziano, Rome) permettent de suivre rigoureusement la démographie de différentes populations d'ongulés couplée au régime de fructification et explorent l'impact des ongulés sur la régénération forestière (suivi assuré par l'ONCFS et le LBBE). Sur une plus large échelle spatiale, l'ONCFS organise et collecte les données relatives à la démographie des populations d'ongulés à travers les tableaux de chasse depuis 1973. Enfin, la FNC supervise et implémente la base de données relative aux dégâts agricoles occasionnés par les ongulés. Le croisement des jeux de données « Masting – Ongulés – Dégâts agricoles » servira à évaluer l'impact indirect du masting sur les cultures.

Dispositif d'échantillonnage « exhaustif » des glandées

La méthode de quantification des glandées utilisée sur 210 arbres du réseau d'observation permet d'estimer précisément le nombre des fleurs femelles et de fruits produits par un arbre et d'en évaluer les caractéristiques (stade de développement, état sanitaire...). Le dispositif d'échantillonnage est constitué d'un filet de 20 m² tendu en hamac sous le houppier ; ce filet est troué au centre et relié à un collecteur dans lequel convergent les fleurs et glands qui chutent. Les échantillons collectés sont ensuite dénombrés et analysés en laboratoire.

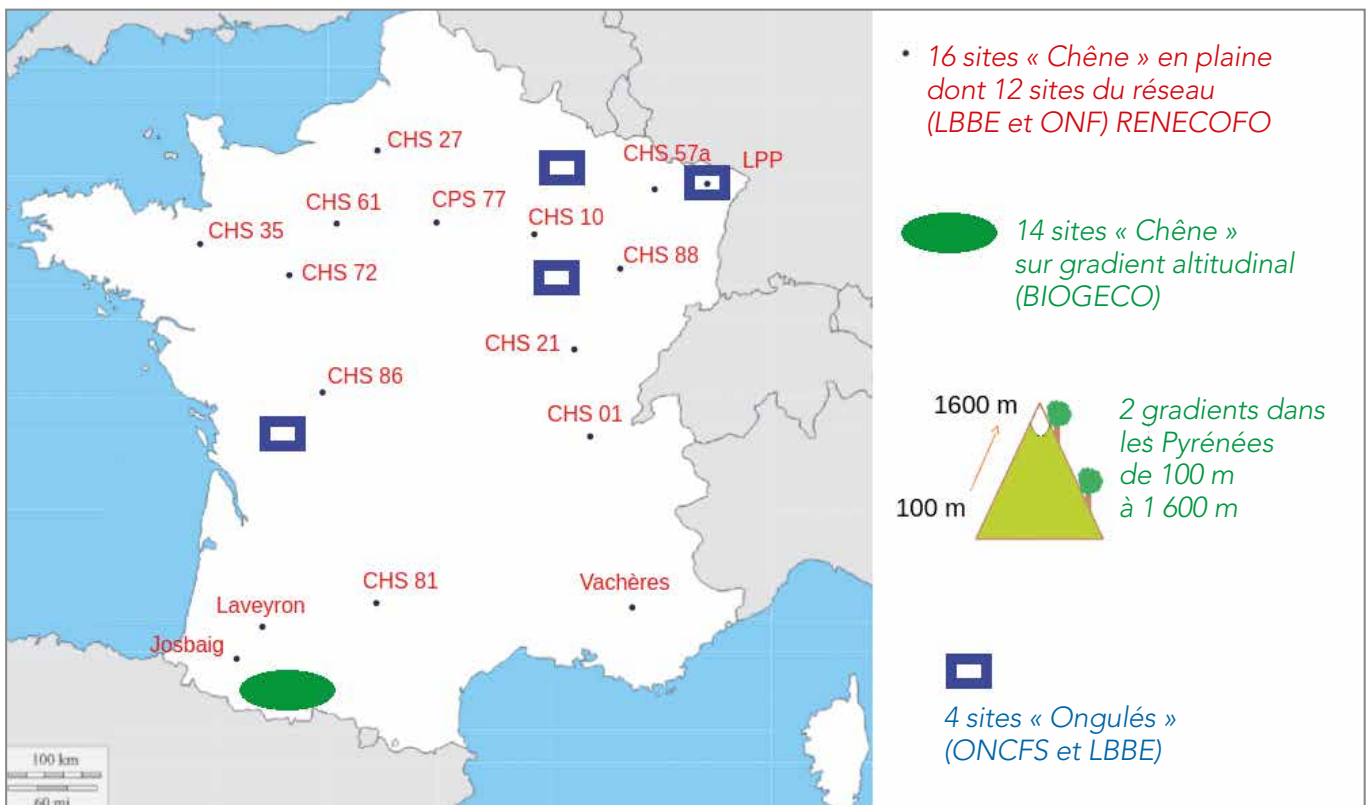


Fig. 3 : les sites du réseau d'observation PotenChêne

PotenChêne vise en outre à développer des méthodes et outils destinés aux forestiers, aux scientifiques et/ou à tout autre organisme pour qui le suivi des glandées constitue un enjeu important. Ces méthodes et outils permettront :

- de quantifier les glandées, de façon simple et rigoureuse, pour suivre la dynamique des glandées à l'échelle d'un massif forestier ;
- d'anticiper les glandées automnales sur un site d'intérêt (un massif forestier, par exemple) en se basant sur l'historique des glandées des années précédentes (ONF-RENECOFOR), les données relatives à l'émission printanière de pollen (Réseau national de Surveillance Aérobiologique) et les conditions météorologiques (Météo-France) ;
- de proposer des scénarios sur le devenir du masting dans le contexte du changement climatique en intégrant les nouvelles connaissances acquises dans ce programme dans des modèles mécanistes du masting.

L'anticipation des glandées automnales devrait notamment aider à mieux préparer les campagnes de régénération forestière, mais aussi à contrôler la démographie des populations d'ongulés : en prévoyant les plans de chasse en fonction de l'intensité de la glandée attendue, il serait possible de limiter en partie les dégâts, forestiers et agricoles, occasionnés par ces ongulés.

Conclusion

Le masting des chênes a des incidences considérables sur le plan écologique (dynamique de la biodiversité forestière) et aussi sur le plan économique (régénération forestière, dégâts agricoles...). Cependant les processus qui sous-tendent ce phénomène ne sont pas très bien élucidés. Compte tenu des changements climatiques actuels et à venir, il devient important de comprendre l'impact des conditions météorologiques sur les grandes étapes du

cycle de reproduction des chênes en particulier sur l'acquisition de ressource et leur allocation dans la floraison et la fructification des arbres et sur le processus de pollinisation. Du point de vue de la sylviculture, le principal enjeu est d'assurer dans les meilleures conditions la réussite du renouvellement des chênaies. Les travaux scientifiques visant à mieux comprendre le masting du Chêne pourront y contribuer de deux manières. À court terme, les connaissances acquises devraient fournir des éléments/outils permettant d'anticiper les glandées massives, de façon à en tirer le meilleur parti pour la régénération naturelle en optimisant la préparation des peuplements et des terrains (ouverture de trouées, relevés de couvert, etc.). À plus long terme, ces connaissances pourraient permettre de proposer des scénarios sur le devenir du masting dans le contexte du changement climatique et d'ajuster en conséquence la stratégie de renouvellement des forêts.

Éliane SCHERMER^a

Vincent BOULANGER^b

Sylvain DELZON^c

Sonia SAID^d

Stefano FOCARDI^e

Benoît GUIBERT^f

Jean-Michel GAILLARD^a

Samuel VENNÉR^a

^a Université de Lyon 1, UMR CNRS 5558 – LBBE, 69622 Villeurbanne
pre.nom@univ-lyon1.fr

^b ONF, Département Recherche, Développement et Innovation

^c Université de Bordeaux-INRA, UMR BIOGECO, 33615 Pessac

^d ONCFS, CNERA Cervidés Sangliers, 52120 Châteauvillain

^e CNR-ISC Istituto per i Sistemi Complessi, 50019 Sesto Fiorentino (Italie)

^f Fédération Nationale des Chasseurs, Service Dégâts de gibiers, 92136 Issy-les-Moulineaux

Bibliographie

Crone *et al.*, 2009. How do plants know when other plants are flowering? Resource depletion, pollen limitation and mast-seeding in a perennial wildflower. *Ecology letters*, vol. 12 n° 11, pp.1119-1126

Isagi *et al.*, 1997. How does masting happen and synchronize? *Journal of Theoretical Biology*, vol. 187 n° 2, pp. 231-239

Kasprzyk *et al.*, 2014. Relationships among weather parameters, airborne pollen and seed crops of *Fagus* and *Quercus* in Poland. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 197, pp. 111-122

Kelly D., Sork V., 2002. Mast seeding in perennial plants: why, how, where? *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 33 n°1, pp. 427-447

Koenig *et al.*, 1996. Acorn production by oaks in central coastal California: influence of weather at three levels. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 26, pp.1677-1683

Koenig *et al.*, 2012. Stabilizing selection for within season flowering phenology confirms pollen limitation in a wind pollinated tree. *Journal of Ecology*, vol. 100 n° 3, pp. 758-763

Koenig W., Knops J., 2013. Large-scale spatial synchrony and cross-synchrony in acorn production by two California oaks. *Ecology*, vol. 94 n° 1, pp.83-93

Koenig *et al.*, 2015. What drives masting? The phenological synchrony hypothesis. *Ecology*, vol. 96 n° 1, pp.184-192

Le Cœur C., 2015. Stratégies d'histoire de vie chez un Sciuridé introduit, le *Tamias* de Sibérie (*Tamias sibiricus*). Thèse de Doctorat MNHN, dir. JL Chapuis. 232 p.

Liebhold *et al.*, 2004. Within-population spatial synchrony in mast seeding of North American oaks. *Oikos*, vol. 104 n° 1, pp. 156-164

Marsot M., Chapuis J.-L., Gasqui P., Dozières A., Masségli S., Pisanu B., Ferquel E., Yourc'h G., 2013. Introduced Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus barberi*) contribute more to Lyme borreliosis risk than native reservoir rodents. *PLOS ONE*, 8(1) : e55377

Ostfeld R.S., 1997. The ecology of Lyme-disease risk - Complex interactions between seemingly unconnected phenomena determine risk of exposure to this expanding disease. *American Scientist*, vol. 85 n° 4, pp. 338-346

Ostfeld R.S., Canham C.D., Oggenfuss K., Winchcombe R.J., Keesing F., 2006. Climate, deer, rodents, and acorns as determinants of variation in Lyme-disease risk. *PLOS Biology*, 4(6), e145

Pearse *et al.*, 2015. Pollen limitation and flower abortion in a wind-pollinated masting tree. *Ecology*, vol. 96 n° 2, pp. 587-593

Pérez-Ramos *et al.*, 2015. Environmental drivers of mast-seeding in Mediterranean oak species: does leaf habit matter? *Journal of Ecology*, vol. 103 pp. 691-700

Pisanu B., Chapuis J.-L., Dozières A., Poux V., Yourc'h G., 2014. High prevalence of *Borrelia burgdorferi* s.l. in the European red squirrel *Sciurus vulgaris* in France. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, vol. 5 pp. 1-6

Sala *et al.*, 2012. Masting in whitebark pine (*Pinus albicaulis*) depletes stored nutrients. *New Phytologist*, vol. 196 n° 1, pp. 189-199

Satake A., Iwasa Y., 2000. Pollen coupling of forest trees: forming synchronized and periodic reproduction out of chaos. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 203 n° 2, p. 63-84

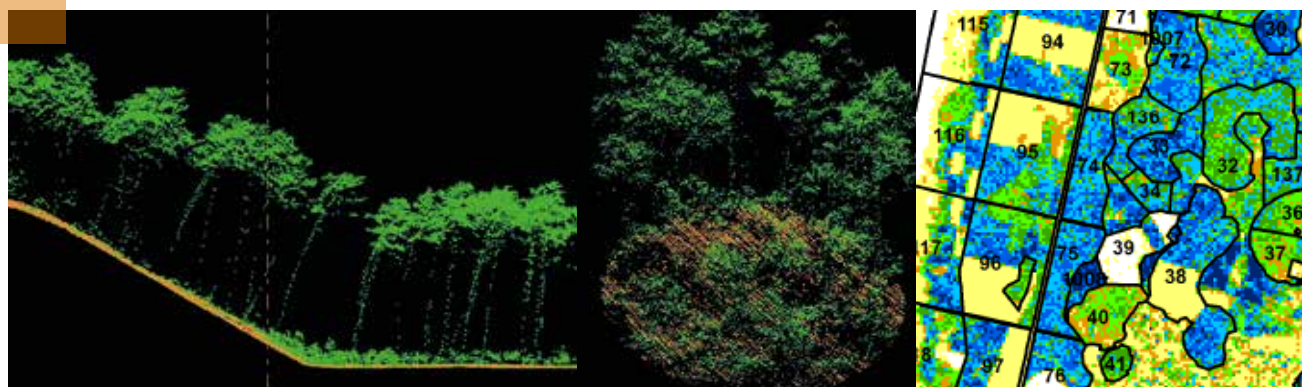
Satake A., Iwasa Y., 2002a. Spatially limited pollen exchange and a long-range synchronization of trees. *Ecology*, vol. 83 n° 4, pp. 993-1005
Satake, A., Iwasa Y., 2002 b. The synchronized and intermittent reproduction of forest trees is mediated by the Moran effect, only in association with pollen coupling. *Journal of Ecology*, vol. 90, pp.830-838.

Sork V., Bramble J., 1993. Prediction of acorn crops in three species of North American oaks: *Quercus alba*, *Quercus rubra* and *Quercus velutina*. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 50 (suppl.), pp. 128-136



Nathalie Pétreil, ONF

Dossier



Démonstrateur « LiDAR aérien pour l'aménagement »

En 2007, c'est d'abord par la possibilité spectaculaire de percer la canopée pour obtenir un modèle numérique de terrain extrêmement précis que le LiDAR aérien a éveillé l'intérêt des forestiers de l'ONF, avec de multiples applications : inventaires de vestiges archéologiques masqués par la végétation, études d'accessibilité et de la desserte en montagne, etc. Cependant l'objectif était aussi d'explorer les potentialités du nuage de points 3D en matière d'estimation de la ressource forestière. Chercher notamment s'il était possible de modéliser, estimer et cartographier les caractéristiques dendrométriques de peuplements avec une précision suffisante, et selon des modalités pertinentes pour faciliter l'élaboration des aménagements forestiers, voire les enrichir.

Aujourd'hui, le bilan de ces recherches sur les applications forestières du LiDAR est assez engageant pour qu'on puisse envisager une utilisation opérationnelle, mais tout n'est pas encore au point. La chaîne de traitement des données reste assez complexe, la validité des résultats, bien cernée pour certaines situations, reste à tester et documenter pour l'ensemble des contextes, l'intégration dans les organisations et les processus de la gestion ne va pas de soi, les complémentarités avec d'autres techniques de télédétection restent à examiner. D'où la nécessité de procéder par étapes dûment formalisées et évaluées, dont en particulier l'étape mixte des « démonstrateurs » qui préfigurent les conditions de mise en œuvre opérationnelle tout en relevant encore de la R&D.

C'est à cette notion de démonstrateur, nouvelle à l'ONF, que nous consacrons ce mini-dossier, à travers la première opération formelle de ce type, appliquée à l'utilisation des données du LiDAR aérien pour l'aménagement forestier dans le cas des forêts littorales dunaires. Nous présentons d'abord le concept particulier de démonstrateur, puis les résultats de cette première opération et enfin les commentaires de l'un des protagonistes concernés localement.

- p. 31 Les démonstrateurs : une étape importante entre R&D et application opérationnelle
par Anne Jolly et Catherine Riond
- p. 37 Estimations dendrométriques pour l'aménagement forestier à l'aide de LiDAR aéroporté : premier démonstrateur en forêts littorales dunaires
par Alain Munoz, Didier Canteloup, Anne Jolly et Catherine Riond
- p. 47 Expérience pratique de la réalisation du projet démonstrateur « LiDAR forestier »
par Didier Canteloup

Les démonstrateurs : une étape importante entre R&D et application opérationnelle

Avec l'apparition de technologies dites de rupture, comme le LiDAR aérien, les apports de la R&D à la gestion forestière ne relèvent plus seulement du progrès technique, au sens de l'amélioration des outils et méthodes existants. Ils induisent des approches inédites, très différentes des usages courants, et qui supposent des compétences (et moyens) spécifiques avec des modes d'organisation adaptés. La démarche d'innovation devient donc en soi un processus à formaliser, avec notamment une étape « démonstrateur » pour bien évaluer les conditions d'un éventuel transfert opérationnel.

Les innovations venant de la recherche-développement (R&D) peuvent consister en une amélioration des outils et méthodes existants ou bien amener des évolutions significatives dans les organisations et les méthodes de travail.

Les marteaux forestiers ergonomiques ou la généralisation du GPS, par exemple, relèvent de la première situation. Pour les marteaux, il s'agissait d'améliorer l'ergonomie d'un matériel usuel et d'en réduire les impacts sur la santé, le mode d'utilisation du nouvel outil restant strictement identique à celui de l'ancien. Avec le GPS, il a fallu mettre en place de nouveaux modes opératoires et former les opérateurs à l'utilisation d'un matériel nouveau, mais les procédures de relevés de limites, contours ou linéaires routiers n'ont pas fondamentalement changé : elles reposent toujours sur un cheminement de terrain et sur le relevé d'informations permettant de mesurer des distances ou des coordonnées. Dans ces deux cas les outils ont évolué, mais pas les méthodes de travail ni les procédures.

Avec l'arrivée de technologies dites « de rupture », qui par définition n'ont pas de lien avec les outils et

méthodes existants, de nouvelles questions se posent aux équipes de R&D. La mise en œuvre de ces nouvelles technologies peut en effet nécessiter de revoir les méthodes de travail, les processus métier, et éventuellement induire des modes d'organisation nouveaux. La R&D ne peut donc pas évaluer seule ces nouvelles technologies, notamment en ce qui concerne l'appréciation de leurs apports et de leurs limites pour l'ONF.

C'est pourquoi, dans le cadre de ses travaux sur l'utilisation de la télédétection (notamment le LiDAR aérien) pour l'aménagement et la gestion forestière, le département Recherche, Développement et Innovation (RDI) de l'ONF a ressenti le besoin de mieux formaliser et organiser les différentes étapes du transfert des résultats de la R&D vers les applications opérationnelles. Parmi ces étapes, celle du « démonstrateur » est en soi une innovation, du moins à l'ONF.

Cet article présente de manière générale la démarche d'innovation, depuis la recherche jusqu'à l'application opérationnelle et décrit plus précisément la notion de démonstrateur, illustrée à travers le cas des travaux sur le LiDAR aérien.

Exemple de trajectoire de la R&D : utiliser le LiDAR aérien pour estimer des variables dendrométriques

L'intégration progressive du LiDAR aérien dans différents projets forestiers, aux enjeux parfois très variables, est un exemple de démarche d'innovation construite par étapes et qui se structure petit à petit.

L'intérêt des données de télédétection 3D pour la forêt est apparu indirectement à l'ONF. En 2007, comme des organismes partenaires avaient acquis, pour des besoins archéologiques, des données LiDAR sur certains massifs forestiers dont la forêt domaniale de Haye, le département RDI a saisi l'opportunité d'expérimenter la modélisation de paramètres dendrométriques à partir de ces données. Ces méthodes, déjà en plein développement dans d'autres pays aux contextes forestiers assez différents du nôtre, en étaient alors à leurs débuts en France, notamment grâce à des travaux « pionniers » d'Irstea à Grenoble et Montpellier.

Les premiers résultats ont rapidement confirmé l'intérêt de la technologie LiDAR pour l'ONF, mais ont également soulevé des questions scientifiques. Nous nous sommes alors associés aux principaux organismes forestiers de

recherche que sont l'IGN, Irstea, FCBA et l'INRA pour construire le projet FORESEE, soutenu par l'ANR, dans l'objectif de confirmer les résultats initiaux et de valider une démarche scientifique. Ce projet s'est déroulé de 2010 à 2014 et a permis de développer des méthodes de modélisation sur des sites d'études aux contextes très variés (Landes, Vosges, Alpes).

Chaque fois que c'était possible, les résultats opérationnels ont été transmis au fur et à mesure aux gestionnaires des sites d'étude, pour utilisation et évaluation : cartes de hauteur dominante pour programmer les travaux d'éclaircie, ou cartes de surface terrière et prédiction à l'échelle de l'unité de gestion en appui à l'élaboration d'aménagements forestiers (Combe d'Aillon, Méaudre, Brotonne...). Mais en dépit de ces échanges au cas par cas, les travaux de R&D ont été menés *en parallèle* de la gestion, sans co-construction initiale, et leurs résultats n'étaient pas nécessairement intégrés dans des opérations de gestion.

Les bons résultats obtenus sur les différents cas d'étude ont suscité des demandes fortes vis-à-vis de la R&D, à mesure que se multipliaient, grâce à la réduction des coûts, les acquisitions de données LiDAR (souvent par des partenaires de l'ONF : collectivités, services d'archéologie, équipes de recherche) : le cahier des charges pour tel vol LiDAR est-il adapté ? Vous est-il possible de traiter les données ? De cartographier précisément telle ou telle variable forestière ? Par ailleurs, des communications émanant de prestataires de services ou d'équipes de recherche laissaient penser que l'utilisation du LiDAR était d'ores et déjà opérationnelle, et renforçaient l'impatience de certains demandeurs.

Tout cela incitait à amorcer le transfert des résultats de la recherche vers l'application, avec la proposition de **démonstrateurs**, dans le cadre d'une réflexion plus globale sur la démarche d'innovation.

Le cheminement de la recherche vers l'opérationnel

L'innovation technique, dont le principe est décrit en figure 1, résulte d'un cheminement qui va de la recherche vers l'utilisation opérationnelle.

En amont, la démarche de R&D est alimentée par :

- les besoins des métiers de l'établissement (principalement ceux de la gestion durable des milieux forestiers, et de l'exploitation des bois);
- les résultats de la recherche académique, éventuellement suscitée par l'ONF via des contrats de recherche ou des cofinancements de thèses;
- la veille technique et scientifique;
- les idées d'évolution ou d'innovation émergeant à l'intérieur de l'ONF.

Lorsque l'opportunité de réaliser un projet de R&D est validée (en fonction des connaissances déjà acquises, de l'état des résultats de la recherche académique et de son intérêt stratégique pour l'ONF), on entreprend **des cas d'étude**, visant à :

- « s'approprier » en interne les résultats de la recherche, en les mettant directement en application et en acquérant les compétences nécessaires;
- approfondir la validation du travail réalisé par la recherche académique, en évaluant les résultats dans une large gamme de situations, pour vérifier leur répétabilité; pour les applications du LiDAR, par exemple, il s'agit de

mener des travaux dans les forêts feuillues de plaines, les résineux de montagne, les forêts mixtes de moyenne montagne ;

- réaliser les premiers tests, mettre au point les premiers protocoles correspondants, développer les premiers outils.

Ces « cas d'études » de la R&D sont mis en œuvre de manière autonome et quasi indépendante des projets des services de gestion, hormis pour l'analyse des besoins et l'évaluation de la pertinence des résultats obtenus.

Après une série de cas d'études jugée suffisamment concluante, le projet passe en phase de « **démonstrateurs** », pour évaluer l'utilisation opérationnelle des méthodes, des outils ou des technologies développés, en situation réelle. Un démonstrateur est une véritable « co-production » entre la R&D et le service opérationnel qui s'y implique; il vise à fournir des résultats qui seront directement utilisés dans un objectif précis, comme par exemple l'élaboration d'un aménagement.

Si les résultats des démonstrateurs sont jugés pertinents, et si la généralisation est décidée, débute alors la phase de « **pilotes** », sous la responsabilité d'une direction « métier ». Il s'agit cette fois de développer les outils et méthodes finaux, définir les modes opératoires et l'organisation adéquats, et tester l'ensemble auprès d'un panel d'utilisateurs non experts. Cette étape de pilote est

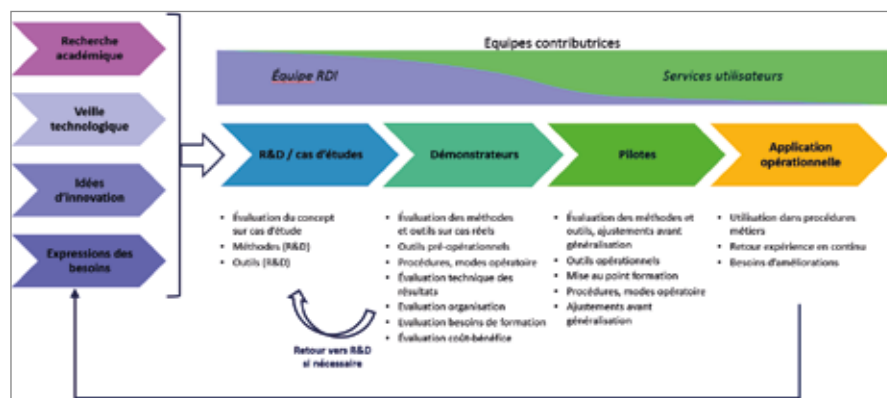


Fig. 1 : représentation schématique simplifiée du processus de transfert de la recherche vers l'opérationnel, adapté au cas de l'ONF

bien connue à l'ONF dans le cadre du déploiement de nouveaux outils informatiques. À ce stade, la R&D n'intervient normalement que très peu, restant en appui des services utilisateurs et surtout de la direction « métier » maître d'ouvrage.

Après une ultime étape de validation et d'ajustements éventuels, l'utilisation opérationnelle débute alors, et peut générer de nouveaux besoins ou de nouvelles idées d'évolution, qui alimentent de nouveau le processus de R&D.

Au fur et à mesure de la démarche, les résultats directement utilisables par les services de gestion peuvent être mis à disposition, sans attendre l'étape de mise en œuvre opérationnelle finale, ni même celle des « pilotes ».

Zoom sur le démonstrateur

Les caractéristiques d'un démonstrateur

Un démonstrateur doit satisfaire à quelques critères essentiels.

Il doit concerner une innovation (une technologie, une méthode, un outil...) dont la maturité a été évaluée par le département RDI (niveau de précision, contextes d'utilisation notamment), soit au travers de cas d'études réalisés en propre, soit grâce aux travaux d'instituts partenaires. Une innovation mise en œuvre dans un démonstrateur n'est pas nécessairement opérationnelle à 100 %, ni robuste dans tous les cas d'utilisation, mais son niveau de maturité doit permettre d'envisager le transfert vers la pratique, en substitution totale ou en complément d'une méthode usuelle.

Il doit répondre à un besoin opérationnel clairement identifié par les équipes locales, correspondant à des résultats attendus bien spécifiés (par exemple type de donnée et précision de cette donnée).

Il doit aussi être proposé ou « accueilli » par des équipes locales très motivées pour mettre en œuvre de nouveaux outils destinés à produire ces résultats, sachant que cela peut bousculer les méthodes de travail. Ces équipes doivent être suffisamment disponibles et prêtes à s'investir dans la réalisation du démonstrateur, qui peut exiger un travail supplémentaire notamment pour l'évaluation formelle des résultats. Elles doivent également s'assurer que le délai de production des résultats par la R&D est compatible avec les échéances de la gestion, tout en acceptant le risque, encore possible à ce stade, que ces résultats déçoivent leurs attentes.

Un démonstrateur doit enfin correspondre à un enjeu stratégique pour l'ONF, et être suffisamment illustratif d'une situation « typique » ou « à enjeu » rencontrée dans le domaine d'application, pour permettre l'appropriation ou la transposition des résultats sur un autre site.

Les objectifs d'un démonstrateur

Un démonstrateur doit permettre d'évaluer l'innovation en conditions pré-opérationnelles en termes de résultats « techniques » et d'analyse coûts/bénéfices. Les principales questions abordées à ce titre sont les suivantes :

- L'innovation apporte-t-elle des réponses suffisantes aux services opérationnels ? Ses résultats sont-ils aussi bons que ceux des méthodes actuelles ? Sont-ils meilleurs ? Quels sont les apports supplémentaires éventuels ? La méthode est-elle robuste à grande échelle ? Quelles en sont les limites d'application ?
- Quels en sont les coûts induits et les bénéfices observés ?
- Est-elle transférable à un opérateur non spécialiste ? Quelles sont les compétences requises ? Les modes opératoires, les outils pré-opérationnels et les processus correspondants sont-ils adaptés

et suffisants ? Faut-il des développements ou des travaux R&D supplémentaires ?

- Quelle organisation nécessite-t-elle ?

Le démonstrateur vise également à amorcer la diffusion des outils et des méthodes, grâce à leur appropriation par des utilisateurs hors R&D, et à mettre en place progressivement un réseau de compétences qui pourra être mobilisé en appui lors des opérations pilotes ou lors de l'utilisation opérationnelle.

Choix du LiDAR aérien pour les premiers démonstrateurs

Si populaire soit-il, le LiDAR aérien n'est qu'une des technologies de télédétection parmi l'ensemble de celles sur lesquelles le département RDI travaille depuis plusieurs années, pour leurs diverses utilisations :

- les images optiques (aériennes, satellites) ont un intérêt pour la connaissance des essences, le suivi des crises sanitaires ou l'évaluation des chablis et le suivi à long terme des peuplements ;
- les images de satellites Radar permettent d'avoir une information succincte sur les changements brusques dans le couvert forestier y compris dans les zones à fort enneigement et présentent un fort potentiel en zones tropicales notamment pour suivre les coupes et les chablis ;
- le LiDAR terrestre devrait permettre d'améliorer la réalisation des mesures de terrain, notamment les placettes d'inventaire ;
- le LiDAR aérien est utile pour l'estimation et la cartographie des paramètres dendrométriques à différentes échelles, en particulier lors de la révision des aménagements ;
- la photogrammétrie (images 3D) ouvre la perspective de caractériser la canopée et d'actualiser une partie des informations acquises grâce au LiDAR aérien.

Le LiDAR aérien apparaît aujourd'hui la plus mature de ces technologies pour estimer et cartographier les variables forestières d'intérêt majeur pour la gestion et l'aménagement forestier, et c'est pourquoi nous l'avons retenue pour réaliser les premiers démonstrateurs.

En effet, les résultats obtenus sur une dizaine de cas d'étude (Haye, Bure, Languimberg, Chamonix, Massif vosgien, Beaufort, Combe d'Aillon, Prénovel, Méaudre, Brotonne...) ont montré que, pour une partie des variables dendrométriques, il est possible d'envisager l'utilisation

opérationnelle des données générées à partir du LiDAR aérien (cf. encadré et figure 2). De plus, au-delà du développement des algorithmes de modélisation, le département RDI a mis au point une chaîne de production de paramètres dendrométriques (figure 3), avec des guides, des modes opératoires, des outils de traitement des données, dont une partie peut d'ores et déjà être testée par des utilisateurs hors R&D, sous le tutorat des chargés de recherche.

Ainsi, les démonstrateurs permettront d'évaluer non seulement les résultats issus du LiDAR mais aussi l'ensemble

(ou une bonne partie) de la chaîne de traitement des données.

Avancement de la démarche

Deux projets démonstrateurs ont été initiés en 2014 et portent sur l'utilisation des données de LiDAR aérien pour la révision d'aménagement forestier.

Le premier concerne des forêts quasi-monospécifiques de pin maritime en zone dunaire : la forêt domaniale de Lège et Garonne et le site « Dunes et forêts du Porge » du Conservatoire du Littoral, avec une surface totale d'environ 6 000 ha. Ce projet est terminé et fait l'objet d'une présentation détaillée dans ce même numéro de *RenDez-Vous techniques*.

Le second couvre le massif domanial de Saint-Gobain et Coucy-Basse, deux forêts de plaine caractéristiques du Nord-Ouest, à dominance de feuillus et à fort enjeu de production, avec un gradient de peuplements réguliers et irréguliers, sur environ 8 500 ha. Le projet se poursuit en 2016 et ses résultats ne sont donc pas encore disponibles.

En fin d'année 2015, l'équipe télé-détection du département RDI a lancé un appel à projet auprès des Directions Territoriales de l'ONF pour sélectionner deux nouveaux démonstrateurs. L'objectif était double : il s'agissait bien sûr de tester nos algorithmes et outils d'analyse dans des contextes complémentaires des précédents, mais aussi de mieux dimensionner notre intervention en concentrant nos efforts sur un petit nombre de projets « démonstrateurs » permettant de poursuivre en parallèle nos travaux de R&D. Parmi les six propositions reçues, deux sites ont été retenus : l'un en Maurienne, l'autre en forêt d'Orléans.

Le site de Maurienne concerne la révision conjointe de trois aménagements de forêt communale résineuse de forte pente, à enjeu de production

Estimation et cartographie de paramètres forestiers à partir de LiDAR aérien : synthèse des résultats actuels de la R&D

- **Hauteur dominante (H0)** : erreurs de 1 m à 1,5 m (moins de 5 %) sur l'ensemble des contextes évalués. Modèle robuste et aussi bon que les mesures de terrain
- **Surface terrière (G), diamètre dominant (D0) ou diamètre moyen (Dg)** : dans les contextes de futaie irrégulière de montagne (à dominante résineuse), ou de futaie régulière (résineuse ou feuillue), les résultats sont concluants avec des erreurs ponctuelles (sur les placettes de 7 ares) respectivement de 3 à 8 m² et de 3,5 à 4,5 cm, l'erreur diminuant à l'échelle de l'UG (possiblement par compensation)
- **Densité de tiges (N)** : les résultats des modélisations ne sont pour l'instant pas très bons quels que soient les contextes, sauf pour les densités inférieures à 500 t/ha
- **Composition** : Les études menées sur des peuplements irréguliers en montagne ont produit de bons résultats pour distinguer dans l'étage dominant les résineux des feuillus, ainsi que le sapin de l'épicéa. Mais l'identification fine des essences nécessite encore des recherches approfondies, dans d'autres types de peuplements et sur d'autres types d'essences
- **Structure** : les travaux de R&D en sont au stade des premiers tests dans quelques sites et restent à poursuivre... avec la difficulté de disposer d'une mesure précise de référence sur le terrain
- **Topographie et desserte** : détection et cartographie des linéaires (limites, desserte) par photo-interprétation et saisie manuelle sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu du LiDAR ; application pour la cartographie de l'accessibilité en cours d'évaluation

Voir aussi la figure 2

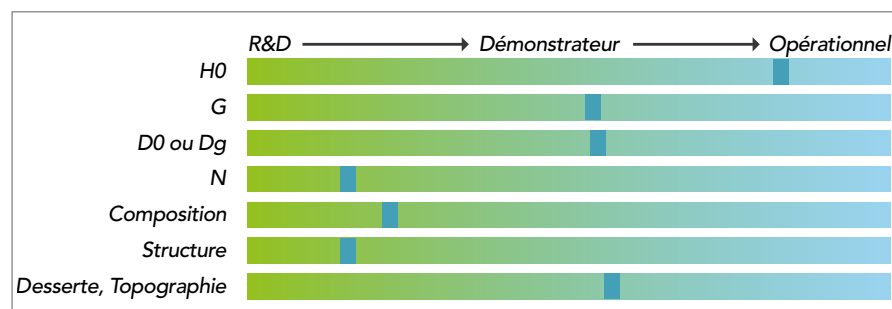


Fig. 2 état d'avancement de la modélisation des paramètres forestiers à partir de LiDAR aérien dans la chaîne de transfert

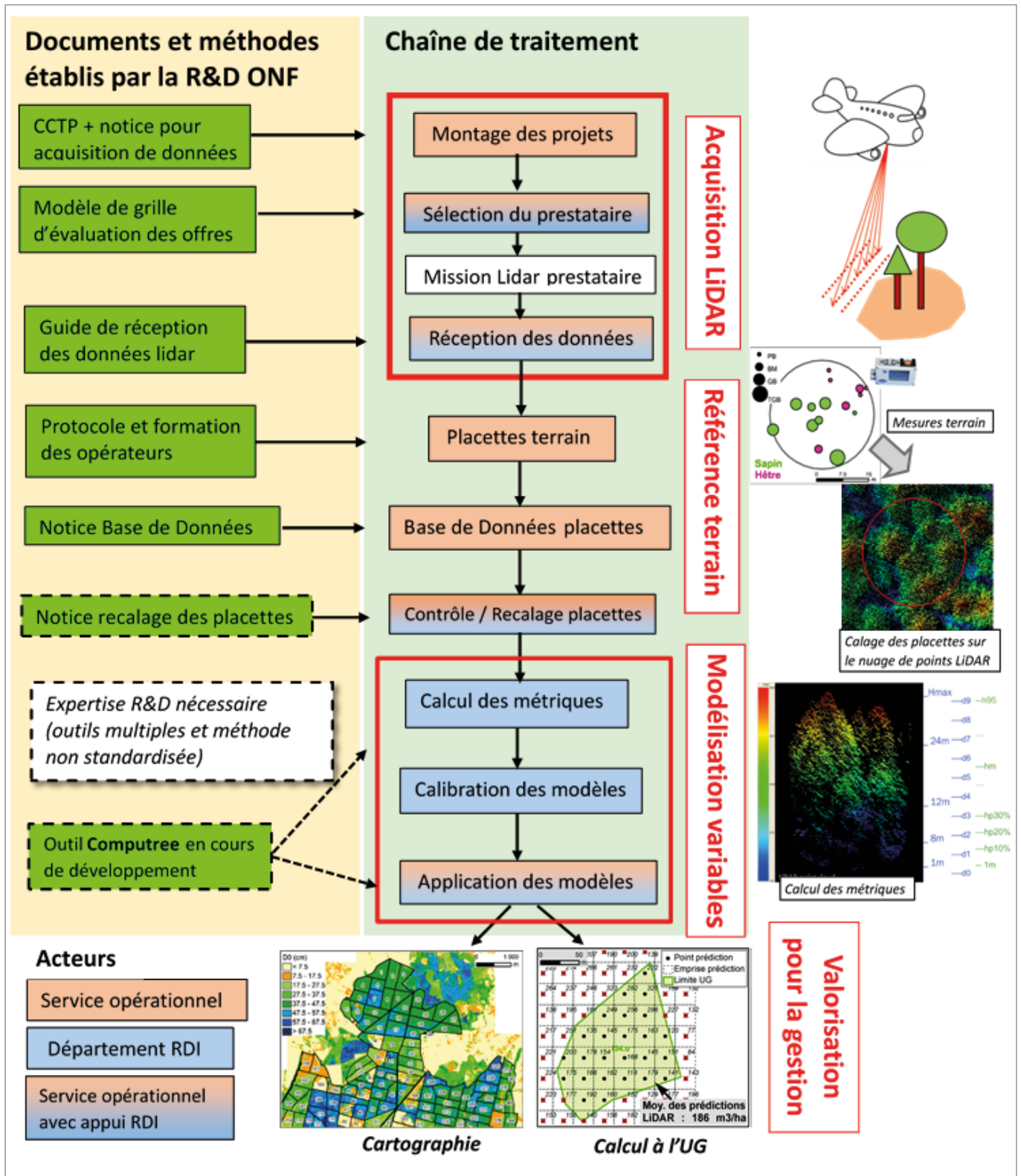


Fig. 3 : déroulement d'un projet d'utilisation de données LiDAR pour l'inventaire et la cartographie dendrométriques, mettant en évidence les outils de la R&D utilisables pour le transfert. Les documents, outils et méthodes en cours de conception sont en pointillés.

et de protection. L'intérêt de ce site est d'évaluer la fiabilité des modèles dans un massif forestier à très forte hétérogénéité stationnelle liée à une gamme d'altitudes allant de 1 100 m à 2 400 m, et à des contextes topographiques variés. Les répercussions de la méthodologie LiDAR sur la durée des phases de terrain dans des contextes très difficiles seront particulièrement évaluées, ainsi que le gain potentiel sur l'analyse de l'exploitabilité et sur la connaissance du capital à l'échelle de la parcelle ou de l'unité de vidange.

Le site d'Orléans porte sur la révision d'aménagement du massif des Bordes, partie de la forêt domaniale, dans un contexte de futaie régulière et d'anciens taillis sous futaie. Là, il s'agit de mieux estimer les hauteurs dominantes (en espérant pouvoir en déduire la fertilité grâce à l'âge des peuplements), et d'avoir une connaissance du capital sur pied (par la surface terrière et le diamètre) plus exhaustive qu'avec un inventaire statistique, y compris dans les peuplements en amélioration et les mélanges feuillus-résineux, tout en optimisant les phases d'inventaire terrain.

Ces deux sites serviront dans le même temps à poursuivre les travaux de R&D dans le domaine de la distinction des essences, de la caractérisation des structures et de la pré-cartographie des stations, toujours bien entendu à l'aide du LiDAR ou d'autres sources de données de télédétection.

Conclusions, perspectives

Avec la mise en place de « démonstrateurs », le département RDI innove en engageant une démarche progressive de transfert tout en poursuivant ses travaux de R&D.

Au-delà de la stricte évaluation des livrables issus de la recherche (cartes de variables dendrométriques, outils, méthodes...), cette action conduit des utilisateurs motivés, « hors R&D »,

à se les approprier. Ces utilisateurs « pionniers » sont l'ébauche d'un réseau de compétences, qui pourra être mobilisé ensuite dans la phase de pilotes, puis celle de l'utilisation opérationnelle.

La réussite d'un démonstrateur repose sur une forte adhésion des différents services impliqués, mais aussi sur la possibilité de remettre en question certaines méthodes et schémas d'organisation établis. La mise à disposition de moyens adéquats, parfois atypiques par rapport aux moyens opérationnels habituels (dans le domaine informatique par exemple) est également un préalable indispensable.

En favorisant les échanges entre les services opérationnels et ceux de la R&D, les démonstrateurs contribuent à l'intégration des progrès techniques dans les actes quotidiens de gestion. En retour ils alimentent les résultats de la R&D qui sont ainsi évalués en conditions pré-opérationnelles, et permettent d'améliorer les méthodes mises au point en R&D.

Le schéma global de transfert de la R&D vers l'application opérationnelle, dans lequel s'insère le démonstrateur, est à adapter au cas par cas ; parfois, on peut plus rapidement passer en phase « pilote », dès lors qu'une évaluation a déjà été faite et a montré l'intérêt stratégique et opérationnel. Par ailleurs certains projets R&D ne se prêtent pas à ce type de démarche, comme par exemple ceux qui visent à acquérir de la connaissance sur les essences (tests de provenances ou d'espèces).

Les premiers démonstrateurs ont porté sur le LiDAR aérien, et ont validé l'intérêt de la technologie pour la réalisation des aménagements forestiers, mais ils ont également suscité des demandes auxquelles la R&D ne peut pas encore répondre (informations fines sur la composition en essences, la structure et la densité).

Les nouveaux démonstrateurs lancés en 2016, et les cas d'études menés en parallèle, ainsi que les travaux complémentaires réalisés avec nos partenaires de recherche, devraient permettre de progresser encore sur ces aspects.

Anne JOLLY

ONF, pôle RDI Nancy

Catherine RIOND

ONF, pôle RDI Chambéry

Références

Il n'est pas aisé de citer pour les lecteurs de RDVT des références qui « ciblent » bien le concept de démonstrateur, cette notion étant souvent diffuse au sein de réflexions plus globales sur la R&D, le développement technologique, l'innovation, ou même l'évaluation comptable des actions de recherche, de développement et d'innovation.

D'une manière générale, la notion de démonstrateur désigne un produit encore en phase d'élaboration, destiné à faire l'objet de premiers tests par des utilisateurs. Le vocabulaire utilisé pour désigner ce stade de maturité technologique diverge parfois. Ainsi, pour l'élaboration de produits industriels, on trouve le terme de *démonstrateur fonctionnel*, situé entre les tout premiers *prototypes* (pas nécessairement fonctionnels) et les *pré-séries* (qui précèdent elles-mêmes la production industrielle).

Estimations dendrométriques pour l'aménagement forestier à l'aide de LiDAR aéroporté : premier démonstrateur en forêts littorales dunaires

Voici l'évaluation technico-économique du premier démonstrateur ONF de l'utilisation des données du LiDAR aérien pour l'aménagement forestier, en l'occurrence celui de forêts littorales dunaires. Si tout n'est pas parfait, les résultats sont très satisfaisants en termes de pertinence et précision des données. Sont aussi abordées les considérations pratiques concernant les coûts, les alternatives et les pistes de progrès, notamment pour permettre la prise en main de ce type d'opération par un réseau de spécialistes locaux.

Les méthodes actuellement utilisées pour recueillir les informations nécessaires à l'élaboration des plans de gestion ou aménagements forestiers reposent notamment sur des inventaires statistiques par échantillonnage. Ce type d'inventaire fournit des informations utilisables à l'échelle de la forêt ou du bloc d'inventaire mais qui sont peu fiables plus localement, à l'échelle de la parcelle de quelques hectares. Aussi, la planification des interventions sylvicoles nécessite de recueillir des informations complémentaires, à cette échelle plus fine, par le biais de descriptions qualitatives à dire d'expert ou de diagnostics quantitatifs spécifiques.

Les données issues de LiDAR aéroporté pour modéliser, caractériser et cartographier la ressource forestière sont utilisées depuis une dizaine d'années dans les pays d'Amérique du Nord ou d'Europe du Nord. L'avantage de cette méthode réside dans la possibilité de cartographier les paramètres dendrométriques et de réaliser des estimations à différentes échelles, de la forêt à la parcelle. En France, il existe encore peu

d'exemples d'applications forestières du LiDAR sur de grandes surfaces. C'est pourquoi, depuis quelques années, le département Recherche, Développement et Innovation (RDI) de l'ONF, en collaboration avec plusieurs organismes de recherche, s'est intéressé au développement de cette technologie pour les forêts publiques ; les études déjà réalisées en ont montré l'intérêt et les potentialités (Munoz *et al.*, 2016 ; Monnet et Munoz, 2016 ; Bock *et al.*, 2011).

Au vu de ces premiers résultats, le département RDI a décidé d'engager une nouvelle étape en lançant en 2014 des projets de *démonstrateurs* (voir l'article précédent de ce dossier), afin de progresser dans le transfert des résultats de la recherche vers l'opérationnel. Le premier démonstrateur réalisé porte sur l'apport du LiDAR pour la réalisation d'aménagements forestiers, et concerne les forêts littorales dunaires ; il englobe le site « Dunes et forêts du Porge » du Conservatoire du littoral et la forêt domaniale de Lège-et-Garonne (département de la Gironde). D'autres sont en cours, comme celui de la forêt domaniale de Saint-Gobain,

dans l'Aisne, pour des types forestiers très différents. L'objectif de ces démonstrateurs est d'exploiter les données de télédétection, essentiellement le LiDAR aéroporté, pour réaliser les diagnostics et les inventaires nécessaires à l'établissement d'aménagements forestiers ou autres plans de gestion.

Le site du démonstrateur

La zone d'étude (figure 1), située sur le littoral girondin, est constituée par la forêt domaniale (FD) de Lège-et-Garonne, pour 4 190 ha, et le site « Dunes et forêts du Porge » du Conservatoire du littoral (CDL) pour 1 584 ha. Les peuplements forestiers, composés principalement de pin maritime (*Pinus pinaster*), sont issus de régénération naturelle assistée et traités en futaie régulière. Il s'agit de forêts littorales atlantiques, reposant sur des sols sableux dont la topographie est marquée par une succession de chaînes dunaires.

Le site Dunes et forêts du Porge est une ancienne forêt privée acquise en 2013 par le CDL. Sur cette forêt, ne possédant aucun historique de

gestion, un plan de gestion intégrant des enjeux de protection, de production de bois, de biodiversité, de naturalité, d'accueil du public et de paysage devait être réalisé par l'ONF avant fin 2015.

La FD de Lège-et-Garonne, dont la révision d'aménagement doit être finalisée courant 2016, est une forêt dunaire aux enjeux complexes; elle est engagée dans la démarche de labellisation « Forêt d'Exception ».

La démarche

Ce projet a été réalisé en suivant la démarche générale mise au point par le département RDI, pour l'organisation et le déroulement d'un projet de ce type (figure 2).

Définition des besoins et objectifs

La première étape est de définir les attentes principales, en collaboration entre les services de gestion et le département RDI.

Il existe d'abord des besoins de connaissance générale du massif, notamment la délimitation des types de peuplements forestiers ainsi que l'inventaire de la desserte forestière, indispensables à la conception d'un aménagement ou d'un plan de gestion. Ici s'ajoute une autre exigence, celle d'identifier les versants abrupts des dunes, difficilement accessibles, non mécanisables mais qui représentent une singularité écologique et paysagère, et qui seront classés hors sylviculture. Pour le site CDL Dunes et forêts du Porge, géré depuis peu par l'ONF, l'enjeu est d'autant plus important que nous n'avons pas d'antécédents en matière de données géographiques. Pour la FD de Lège-et-Garonne, l'objectif est de mieux identifier les limites des peuplements et d'adapter en conséquence celles des unités de gestion issues du précédent aménagement.

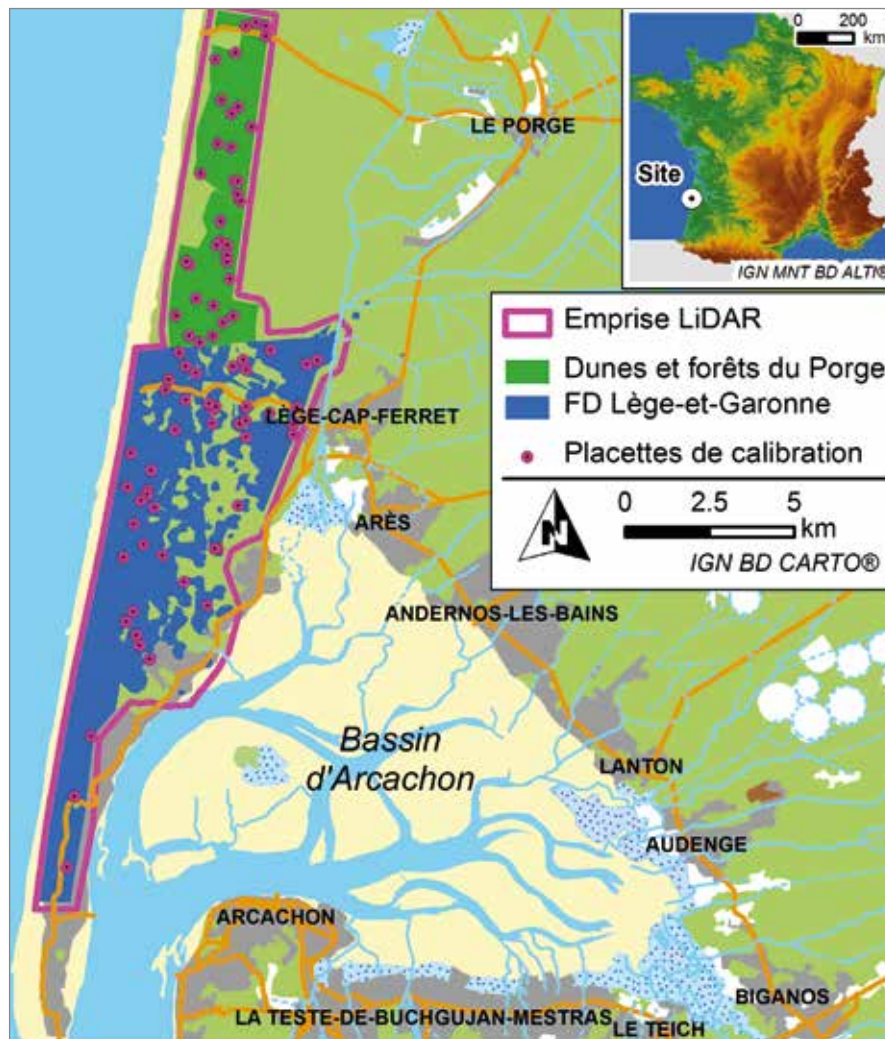


Fig. 1 : présentation du site démonstrateur

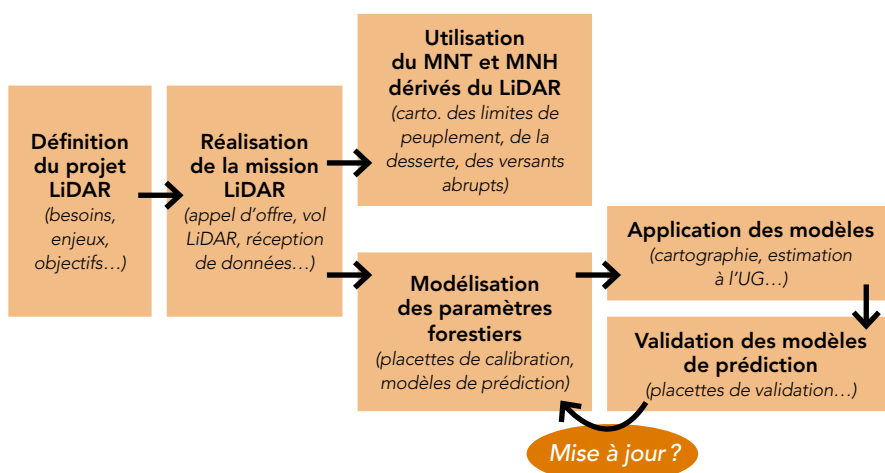


Fig. 2 : organisation générale d'un projet LiDAR de « type forestier »

Pour ce qui est de la caractérisation dendrométrique des peuplements, nous nous intéressons à l'estimation de la hauteur dominante (H0) qui, par le biais de la relation âge-H0, traduit l'effet des facteurs stationnels sur la croissance des peuplements et permet de déterminer la classe de fertilité, pour choisir le référentiel sylvicole à appliquer (Sardin, 2009). Sont aussi demandées l'estimation du volume (V) et de la surface terrière (G), qui représentent le capital forestier sur pied et permettent d'évaluer les récoltes de bois à réaliser, ainsi que celle du diamètre quadratique moyen (Dg) qui, dans les peuplements à enjeu de production, est le critère d'exploitabilité déclenchant la récolte finale des bois. Enfin, l'estimation de la densité de tiges (N) doit permettre de se situer par rapport aux référentiels de sylviculture et de repérer les écarts importants (surdensité ou sous-densité) notamment pour les jeunes peuplements.

La forêt domaniale de Lège-et-Garonne a fait l'objet d'un double inventaire (l'inventaire-diagnostic habituel par échantillonnage et l'inventaire à l'aide des données LiDAR) dans l'objectif de réaliser un bilan comparatif à la fois en termes de coût

et d'exactitude des résultats obtenus. Au contraire, le plan de gestion de la forêt CDL du Porge n'a été établi qu'à partir de données issues de la télédétection.

Réalisation de la mission LiDAR

Pour se prêter aux traitements et analyses correspondant à ces besoins, les données LiDAR doivent satisfaire à un certain nombre d'exigences. Le dossier de consultation pour la prestation d'acquisition des données comportait donc un cahier des clauses techniques particulières (CCTP) précisant les spécificités des données à acquérir. Après la sélection du prestataire (le groupe ECARTIP, Lyon), le vol LiDAR couvrant une surface de 8 250 ha (figure 1), a été réalisé en septembre 2014 avec une densité moyenne d'émission constatée de 19,5 points/m², bien supérieure à la densité minimum de 6 points/m² demandée dans le CCTP. Le prestataire, nouveau venu dans le domaine des applications forestières du LiDAR, a volontairement dépassé le seuil requis, par précaution. Enfin, la livraison des données, sous forme d'un nuage de points 3D (figure 3), d'un modèle numérique de terrain (MNT) et d'un modèle numérique de hauteur (MNH) (figure 7), a fait l'objet d'une

phase de réception formalisée, avec vérification rigoureuse des données. Les modes opératoires élaborés et mis à disposition par le département RDI (notices méthodologiques pour la rédaction du CCTP ou pour la réception et vérification des données) ont permis au personnel spécialisé de l'Agence Études Sud-Ouest de réaliser une partie de cette étape.

Modélisation des paramètres forestiers

L'estimation des paramètres forestiers se fait selon un processus de modélisation qui exige, dans un premier temps, un réseau de placettes terrain dont les mesures permettront de calibrer les modèles. Le nombre et la position de ces placettes répondent ici à un échantillonnage « raisonné » d'après les données LiDAR, afin de couvrir une large gamme de peuplements en hauteurs et densités. Pour notre site d'étude, ce réseau compte 83 placettes (figure 1 et tableau 1), qui ont été mesurées par l'équipe projet LiDAR de l'Agence Études Sud-Ouest entre septembre 2014 et février 2015. Elles ont été inventoriées en essence et diamètre sur un rayon de 9 m pour les perches (7,5 cm ≤ Ø < 17,5 cm) et sur un rayon de 15 m pour les arbres (Ø ≥ 17,5 cm). De plus, sur



Fig. 3 : extrait du nuage de points LiDAR correspondant strictement à l'emprise d'une placette de calibration

Le nuage de points fourni par le prestataire est classifié en fonction de sa nature : on distingue ici les points correspondant au sol (en orange) et à la végétation (en vert)

Paramètre forestier	Min	Moy	Max	CV
H0 (m)	4,2	15,3	25,1	37 %
Dg (cm)	10,7	28,6	53,9	42 %
G (m ² /ha)	0,4	20,0	42,8	53 %
V (m ³ /ha)	0,9	148,1	406,1	67 %
N (t/ha)	39,0	363,7	1099,0	66 %

Tab. 1 : récapitulatif des paramètres forestiers mesurés sur les placettes de calibration

Min : valeur minimum ; Moy : moyenne ; Max : valeur maximum ; CV : coefficient de variation (illustre la variabilité des données) ; H0 : hauteur dominante ; G : surface terrière (arbres de diamètre ≥ 7,5 cm) ; V : volume découpe 7 cm (idem) ; Dg : diamètre quadratique moyen (idem) ; N : densité de tiges (idem).

chaque placette, les 6 plus gros arbres ont été mesurés en hauteur afin de pouvoir calculer la hauteur dominante. La position des placettes a été relevée sur le terrain à l'aide d'un récepteur GNSS (*Trimble GéoExplorer 6000*) et en respectant les bonnes pratiques établies (Munoz, 2014). Un recalage des placettes a ensuite été effectué sous SIG (système d'information géographique) par le personnel spécialisé de l'Agence Études Sud-Ouest afin de faire correspondre le mieux possible la position des arbres relevés sur le terrain avec les couronnes des arbres visibles sur les données LiDAR.

Puis nous avons extrait du nuage de points LiDAR les « cylindres » de points correspondant à l'emprise de chaque placette de calibration terrain (figure 3). Sur ces « cylindres », des indicateurs LiDAR sont calculés, c'est-à-dire des « métriques » descriptives du nuage de points (statistiques de distribution des hauteurs,

statistiques de densités, des taux de pénétration, etc.). Ils seront utilisés comme variables explicatives dans la construction (calibration) des modèles de prédiction des paramètres forestiers. D'autres indicateurs, reposant sur l'identification des couronnes d'arbres sur le MNH LiDAR (figure 4), ont été également calculés; il est établi que leur utilisation améliore sensiblement la qualité des modèles dendrométriques (Munoz *et al.*, 2016).

Enfin, la modélisation des paramètres forestiers se fait à l'aide d'une fonction statistique mettant en relation un paramètre à expliquer, représenté par une valeur mesurée sur le terrain (par exemple la hauteur dominante H_0), avec des variables explicatives correspondant aux indicateurs LiDAR calculés sur la même emprise que les placettes terrain (figure 5). Cette démarche fournit, pour chaque paramètre forestier étudié, plusieurs modèles qui sont

évalués grâce à différents tests statistiques, et seuls les meilleurs sont conservés, notamment ceux ayant une erreur de prédiction faible.

Application des modèles de prédiction

Une fois les modèles de prédiction sélectionnés, il a été possible de les appliquer à l'ensemble de la zone couverte par la mission LiDAR pour produire une cartographie en continu. Cette spatialisation nécessite d'abord un découpage du nuage de points selon un maillage systématique, ici des « pixels » à base carrée sur lesquels ont été calculés les indicateurs LiDAR nécessaires à l'application des modèles de prédiction. On obtient ainsi la valeur prédite des paramètres forestiers pixel par pixel (figure 6). La taille des pixels a été fixée à 26,5 m de côté (702 m²) afin de correspondre, pour le calcul des indicateurs LiDAR, à la surface des placettes de calibration terrain (706 m²).

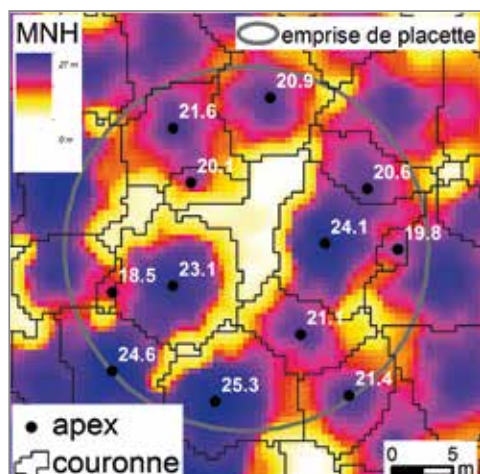


Fig. 4 : exemple d'identification des couronnes d'arbre sur le MNH LiDAR d'une placette de calibration

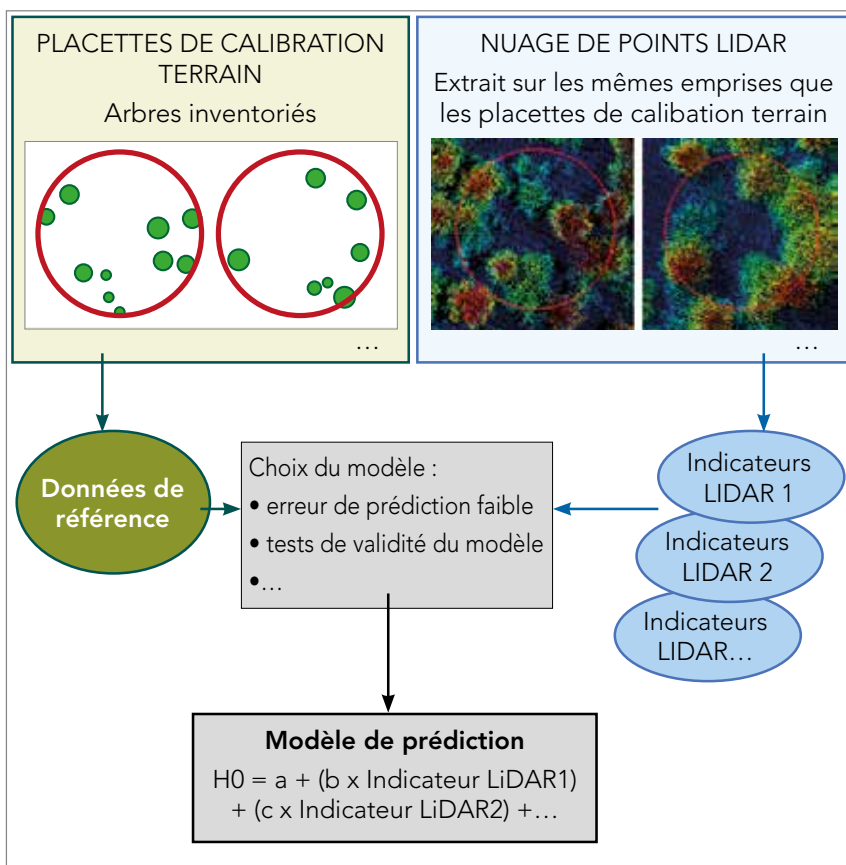


Fig. 5 : Schéma de la modélisation des paramètres forestiers à l'aide d'un modèle statistique

Le modèle met en relation la référence terrain mesurée sur des placettes en fonction de variables explicatives correspondant à des indicateurs LiDAR calculés sur la même emprise.

Pour le gestionnaire, cette cartographie des prédictions dendrométriques a ouvert une possibilité particulièrement intéressante : réaliser une estimation de la ressource à différentes échelles, et notamment à celle des unités de gestion ou des parcelles forestières. À partir de la prédiction obtenue sur chaque point de la grille systématique, le calcul à l'échelle de la parcelle a consisté à faire la moyenne des valeurs des pixels dont le centre était inclus dans la parcelle (figure 6).

Validation des modèles de prédiction

Avant utilisation opérationnelle des données produites, cartes ou estimations à l'unité de gestion, il fallait cependant procéder à une dernière étape consistant à expertiser les prédictions des modèles sur des données indépendantes. Cette validation a porté sur des surfaces de 1 ha afin d'évaluer les « prédictions LiDAR » sur des surfaces plus importantes que celle des placettes ayant servi à la calibration des modèles (7 ares). À cette fin, les équipes de l'agence ont inventorié, selon les mêmes modalités que pour l'échantillon initial, 25 « grappes » de 4 placettes. Pour chacune des variables dendrométriques, l'évaluation de la qualité des prédictions a été réalisée par la comparaison entre la moyenne des prédictions LiDAR et la moyenne des mesures des 4 placettes de référence terrain de chaque surface de validation de 1 ha.

Utilisation des données MNT et MNH

En plus de la prédiction des paramètres forestiers, l'utilisation du modèle numérique de terrain (MNT) et du modèle numérique de hauteur (MNH), directement dérivés du LiDAR, a permis de cartographier les limites de peuplement et aidé à l'inventaire de la desserte forestière (figure 7, page suivante). Cette technique simple a consisté à « photo interpréter » les cartes de relief et de hauteur. De plus, les versants abrupts, correspondant aux pentes supérieures à 30 %, ont été délimités automatiquement afin de permettre au gestionnaire la création des unités de gestion correspondantes. Il est aussi possible de créer d'autres produits dérivés du MNT comme des courbes de niveau au tracé précis et dont l'équidistance est ajustable en fonction des besoins (Munoz et al., 2013).

Les résultats obtenus et leur intérêt pour l'aménagement forestier

La mise en œuvre de la démarche présentée précédemment a permis de prédire et cartographier la plupart des paramètres forestiers répondant aux besoins des services de gestion.

Hauteur dominante (H0) et fertilité (F)

Avec une erreur inférieure à 4 % (erreurs de prédiction d'environ 40 cm pour le modèle jeunes peuplements de moins de 16 m et de 80 cm pour

celui des peuplements de plus de 16 m – tableau 2), la prédiction de la hauteur dominante est très satisfaisante. Ces erreurs sont en concordance avec la précision visée dans le guide des sylvicultures des forêts littorales atlantiques dunaires (Sardin, 2009) pour déterminer la classe de fertilité, précision qui est de 3 m à l'âge de référence (40 ans) et de 1 m pour les jeunes peuplements de 10 ans.

L'application des modèles de prédiction a permis de réaliser une carte de la hauteur dominante et, grâce au croisement entre hauteurs dominantes et âges des peuplements issus des documents de gestion, une carte de la fertilité. L'utilisation du guide des sylvicultures a aussi permis de réaliser une cartographie du stade d'intervention théorique auquel devrait se trouver le peuplement. Ces cartes permettent d'aider le gestionnaire à situer les peuplements par rapport au référentiel sylvicole (figure 8 page suivante).

Surface terrière (G) et volume (V)

Les modèles de prédiction de la surface terrière et du volume ont des erreurs de prédiction (tableau 2), à l'échelle de la placette de 7 ares, respectivement de 2,9 m²/ha (15 %) et 22,1 m³/ha (15 %). Lors des validations indépendantes à l'échelle de l'hectare, des écarts plus faibles (de l'ordre de 10 %) ont été constatés entre la référence terrain et les prédictions LiDAR pour les deux

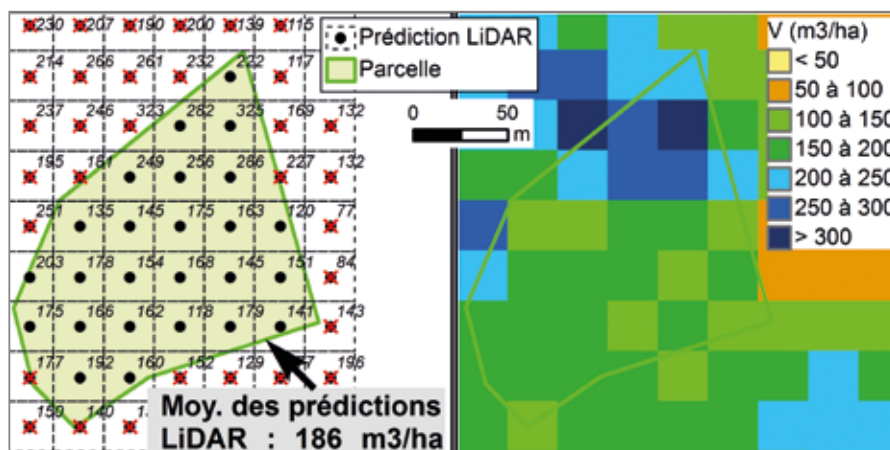


Fig. 6 : cartographie et estimation des paramètres forestiers sur une surface

Le modèle de prédiction est appliqué sur un maillage systématique correspondant à la taille des placettes de calibration (pointillé noir à gauche), ce qui permet d'obtenir une cartographie (à droite). Le calcul à l'échelle de la parcelle (en vert à gauche) consiste à faire la moyenne des valeurs des pixels dont le centre est inclus dans la parcelle (points noirs). Les pixels dont le centre est à l'extérieur (croix rouge) sont exclus.

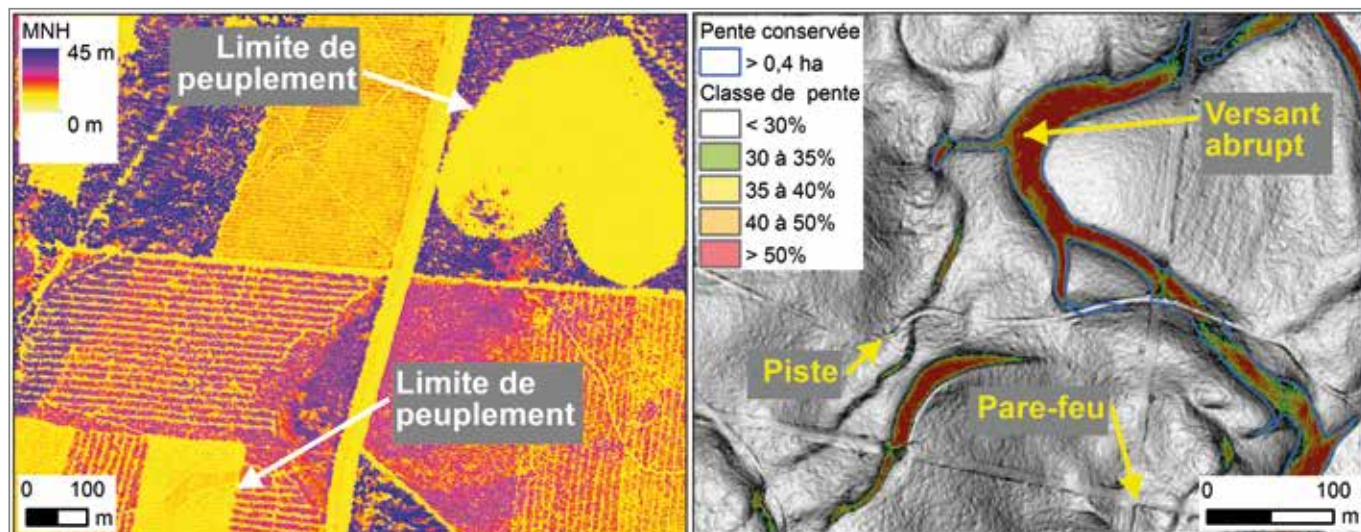


Fig. 7 : utilisation du modèle numérique de hauteur (MNH) et du modèle numérique de terrain (MNT) pour la cartographie des limites de peuplement et de la desserte forestière et la délimitation des versants abrupts
 Sur le 1er secteur, à gauche, le MNH LiDAR permet d'identifier précisément les limites de peuplements et ainsi de créer les unités de gestion correspondantes. Dans le 2ème exemple, à droite, le MNT (transformé en pentes), permet d'identifier visuellement la desserte forestière et de délimiter automatiquement les versants abrupts de plus de 30 % de pente.

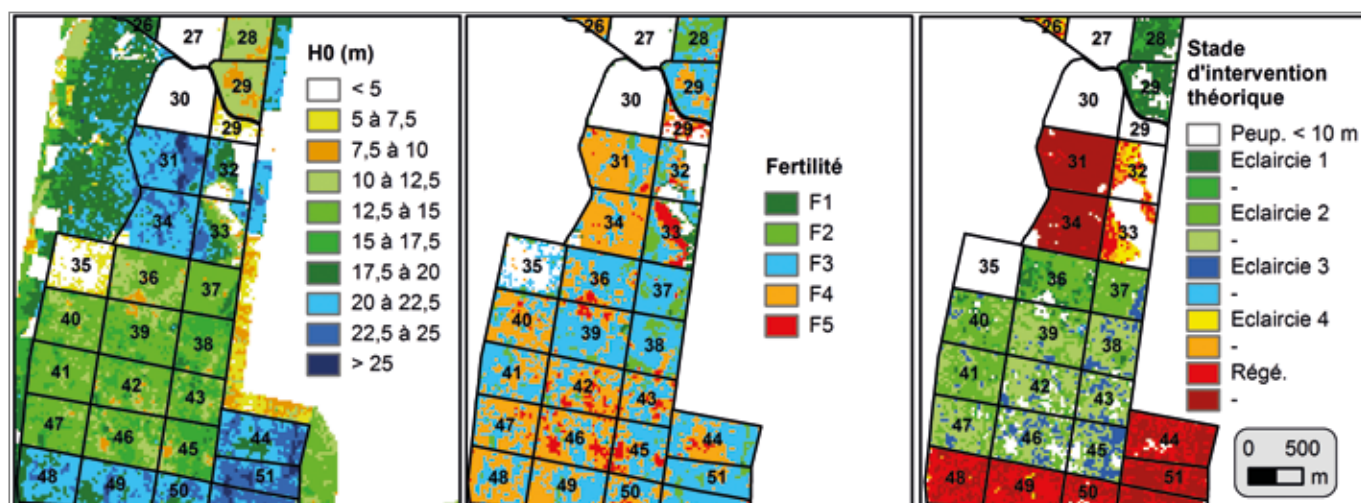


Fig. 8 : exemples d'applications de la modélisation de la hauteur dominante (H0)
 À gauche, cartographie de la hauteur dominante (H0) prédite à partir des données LiDAR. Au milieu, la fertilité (décroissante de F1 à F5) est calculée à partir de H0 et de l'âge des peuplements. À droite, la cartographie du stade d'intervention théorique auquel devrait se trouver le peuplement est issue du référentiel sylvicole (ici les peuplements en vert foncé sont au stade théorique de la 1re éclaircie, alors que les peuplements en rouge ont atteint celui de la mise en régénération).

Paramètre forestier	Erreur des modèles de prédiction LiDAR (placette de 7 ares)	Évaluation indépendante des erreurs de prédiction LiDAR à l'échelle de 1 ha	
		Biais	Erreur
H0 (m)	pour H0 < 16 m : 0,4 m (4 %)	/	/
	pour H0 ≥ 16 m : 0,8 m (4 %)		
Dg (cm)	2,1 cm (7 %)	-0,1 cm (-0 %)	1,9 cm (6 %)
G (m ² /ha)	2,9 m ² /ha (15 %)	-0,7 m ² /ha (-3 %)	2,3 m ² /ha (9 %)
V (m ³ /ha)	22,1 m ³ /ha (15 %)	-3,2 m ³ /ha (-2 %)	18,5 m ³ /ha (10 %)
N (t/ha)	110 t/ha (30 %)	49 t/ha (13 %)	140 t/ha (35 %)

Tab. 2 : synthèse des erreurs des modèles de prédictions des paramètres forestiers

paramètres. Cette constatation tend à conforter l'utilisation des prédictions à l'échelle de la parcelle ou de l'unité de gestion, qui semblent plus « fiables » que les prédictions au pixel cartographique de 7 ares. Les cartes produites seront donc plutôt à utiliser en valeurs relatives afin de repérer les variations spatiales du capital forestier.

Ces modèles ont permis de réaliser des cartes de la surface terrière et du volume sur l'ensemble du site d'étude (figure 9) ainsi que des estimations, à l'échelle des unités de gestion, des prévisions de récoltes du groupe de régénération.

Diamètre quadratique moyen (Dg)

Le modèle de prédiction du diamètre quadratique moyen est très satisfaisant avec une erreur de prédiction faible de 2,1 cm, soit 7 % (tableau 2). La validation indépendante à l'échelle de l'hectare confirme la très bonne qualité des prédictions car les écarts entre la référence terrain et les prédictions LiDAR sont très faibles avec un biais de seulement -0,1 cm (0 %) et une erreur de 1,9 cm (6 %).

Ce modèle a permis de réaliser une carte du diamètre quadratique moyen sur l'ensemble du site d'étude (figure 10). L'analyse de cette cartographie permet d'aider à la planification et à la priorisation des mises en régénération des peuplements : on y repère très simplement les peuplements ayant atteint ou dépassé le diamètre d'exploitabilité et dont la régénération devrait être entamée.

Densité de tiges (N)

À la différence des autres variables dendrométriques, le modèle de prédiction de la densité a une erreur de prédiction élevée, de 110 t/ha soit 30 % (tableau 2). La validation indépendante à l'échelle de l'hectare confirme ces mauvais résultats (erreur de 140 t/ha soit 35 %) avec des écarts très importants pour les jeunes peuplements denses. En conséquence,

la prédiction ne permet pas de situer avec fiabilité les jeunes peuplements par rapport aux référentiels de sylviculture et de repérer les écarts importants de densité.

Comparaison des méthodes d'inventaire

Parallèlement au projet LiDAR, la FD de Lège-et-Garonne a fait l'objet de l'inventaire statistique de terrain habituellement mis en œuvre dans la région pour une révision d'aménagement, et qui ne concerne que les peuplements de plus de 20 ans. Le protocole consiste à inventorier des placettes temporaires à surface fixe selon un taux d'échantillonnage de 1 placette tous les 4 ha, basé sur une grille systématique. L'objectif est ici d'obtenir à la fois un inventaire à l'échelle du bloc (par exemple pour le groupe de régénération), mais aussi de quantifier les paramètres forestiers à l'échelle de la parcelle ou de l'unité de gestion, pour pouvoir planifier précisément les interventions sylvicoles. Ce protocole local d'inventaire-diagnostic diffère quelque peu du protocole labellisé national (ONF, 2013) qui consiste bien à réaliser un inventaire quantitatif par bloc, mais prescrit à l'échelle de la parcelle une simple description qualitative à dire d'expert, quitte à devoir parfois réaliser un diagnostic quantitatif en complément, pour des problématiques bien ciblées (le taux d'échantillonnage du protocole national est ainsi plus faible que celui de l'inventaire-diagnostic local).

Dans le cadre du projet démonstrateur, il a été possible de faire un bilan comparatif des différentes méthodes d'inventaires, à la fois en termes de coût et d'avantages/inconvénients.

Coûts d'inventaire

Le coût du projet démonstrateur LiDAR, est de 44 052 € pour les 5 800 ha de forêt publique inventoriés, soit un coût par hectare de 7,60 €/ha (tableau 3 page suivante). Pour l'inventaire-diagnostic par

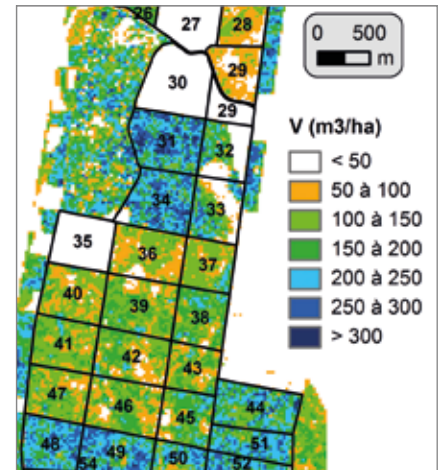


Fig. 9 : illustration de la cartographie du volume (V) réalisée à partir des données LiDAR

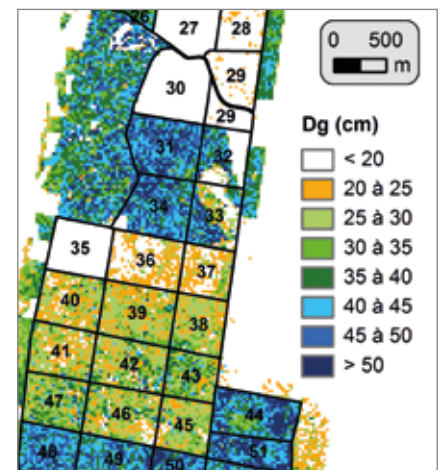


Fig. 10 : illustration de la cartographie du diamètre quadratique moyen (Dg) réalisée à partir des données LiDAR

Cette cartographie aide à la planification des mises en régénération car il est possible de repérer les peuplements ayant atteint ou dépassé le diamètre d'exploitabilité (en bleu sur la carte).

échantillonnage de la FD de Lège-et-Garonne, le coût est de 22 067 € pour les 1 965 ha inventoriés soit un coût par hectare de 11,20 €/ha.

À partir des suivis de temps recueillis dans le cadre du projet démonstrateur, il est possible de définir les rendements et les temps pour chaque action d'inventaire et de simuler ainsi le coût en fonction d'une surface à inventorier dans des contextes forestiers similaires. Cet exercice a été réalisé pour trois

types d'inventaire (à partir des données LiDAR, inventaire-diagnostic local et inventaire-description selon protocole labélisé national) et pour des surfaces inventoriées variant de 500 à 5 000 ha (figure 11).

Pour de petites surfaces (environ 500 ha), le coût d'inventaire à partir des données LiDAR est très important et nettement supérieur aux coûts d'inventaire statistique par échantillonnage sur placettes à surface fixe (protocoles local et labélisé national). Ce coût « LiDAR » diminue rapidement en fonction de la surface pour se rapprocher du coût d'inventaire par échantillonnage et, au-delà de 2 500 ha inventoriés, il devient inférieur à celui d'un inventaire-diagnostic (protocole local) mais reste toujours supérieur à celui d'un inventaire-description (protocole labélisé national).

Ces simulations ne doivent en aucun cas être extrapolées à d'autres contextes forestiers, car les temps d'implantation et inventaire des placettes de terrain et le coût d'acquisition des données LiDAR sont directement liés aux conditions locales (relief, densité et variabilité des peuplements, etc.).

Intérêt et faiblesses

Au-delà du coût, les méthodes d'inventaire doivent être comparées en fonction de leurs qualités, précisions, avantages et inconvénients (figure 12).

L'intérêt le plus spectaculaire de la méthode d'inventaire à partir des données LiDAR, réside dans la possibilité de cartographier les paramètres forestiers. Il est ainsi possible de cartographier avec fiabilité la hauteur dominante (H0) et le diamètre quadratique moyen (Dg). Pour la surface terrière (G) et le volume (V), bien que l'erreur ponctuelle soit d'environ 15 %, les cartes produites permettent au moins d'analyser la répartition en relatif. En revanche, la prédiction de la densité de tiges (N) présente des erreurs ponctuelles importantes et des biais dans les jeunes peuplements denses,

ACTION	Coût €/ha	%
Définition du projet LiDAR	0,13	2 %
Réalisation de la mission LiDAR	3,80	50 %
Modélisation des paramètres forestiers (y.c. placettes de calibration)	2,26	30 %
Validation des modèles	1,13	15 %
Modélisation définitive	0,27	4 %
TOTAL	7,60	100 %

Tab. 3 : bilan des coûts du projet démonstrateur LiDAR

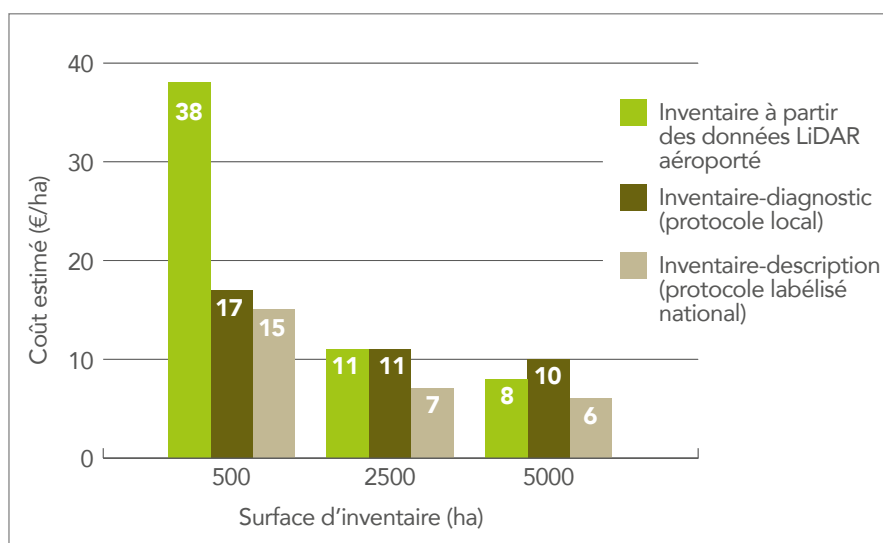


Fig. 11 : simulation des coûts d'inventaire en fonction de la surface inventoriée, pour des situations similaires à celles du démonstrateur (résineux réguliers de plaine)

et il est donc risqué de vouloir utiliser la carte à des fins opérationnelles (le LiDAR ne dispense pas d'un diagnostic spécifique des jeunes peuplements). Indépendamment des paramètres dendrométriques, l'utilisation directe des modèles de base, tels que le MNT et le MNH, permet d'identifier les limites de peuplements forestiers avec une meilleure précision que sur les orthophotos actuellement disponibles; elle permet aussi la délimitation automatique des versants abrupts et aide à l'inventaire de la desserte forestière. Autrement dit, en termes d'analyse de la ressource et de l'espace forestier en général, la « méthode LiDAR » est bien plus riche qu'un simple inventaire.

L'autre avantage majeur de la « méthode LiDAR » est de pouvoir estimer la ressource forestière à différentes échelles, de la forêt à la parcelle. À l'échelle du bloc d'inventaire, les prédictions LiDAR de la surface terrière (G) sont aussi fiables que les estimations statistiques de l'inventaire-diagnostic de la FD de Lège-et-Garonne, qui a des erreurs statistiques très faibles (erreurs de 3 à 7 %, inférieures à ce que préconise la directive nationale pour ce type de forêts : erreur recherchée de 8 à 12 %). En effet, les écarts entre les deux méthodes ne sont que de 0,2 à 0,8 m²/ha (1 à 3 %). Mais à l'échelle de la parcelle ou de l'unité de gestion, les erreurs statistiques de l'inventaire-diagnostic sont souvent importantes (20 % en moyenne et pouvant dépasser les

50%) compte tenu du faible nombre de placettes; 25 % des unités de gestion ne contiennent même qu'une seule placette rendant tout calcul statistique impossible. Alors que les estimations LiDAR à l'échelle de l'hectare ont des erreurs de l'ordre de 10 % pour la surface terrière et le volume.

Le principal inconvénient du LiDAR à ce jour est de ne pas apporter d'information sur les essences.

Conclusion, perspectives

Ce projet a permis de démontrer que, dans le contexte étudié de peuplements de pin maritime sur relief dunaire, traités en futaie régulière, l'estimation des paramètres forestiers à partir de données LiDAR aéroporté permet d'obtenir les informations nécessaires à l'élaboration d'aménagements forestiers ou de plans de gestion. Les paramètres tels que la hauteur dominante (H0), la surface terrière (G), le volume (V) ou le diamètre quadratique moyen (Dg) ont pu être prédits, à différentes échelles, avec des erreurs inférieures ou équivalentes à celles des méthodes d'inventaire statistique par échantillonnage. Seule la densité de tiges (N), notamment pour les jeunes peuplements denses, n'a pu être modélisée avec une précision satisfaisante; si les diagnostics de terrain complémentaires restent nécessaires, ils sont tout de même facilités par les données produites qui permettent de mieux cibler les peuplements relevant d'une analyse spécifique.

Les cartographies réalisées à partir de la « méthode LiDAR » permettent également de prendre en compte l'hétérogénéité du peuplement au sein d'une parcelle et d'adapter ainsi la gestion ou les consignes de martelage. De plus, les données directement dérivées du LiDAR, comme le modèle numérique de hauteur (MNH) ou le modèle numérique de terrain (MNT), sont d'une grande utilité pour la cartographie précise des limites de peuplement, de la desserte, des singularités topographiques...

Le coût d'inventaire à l'aide des données LiDAR, bien qu'important sur de petites surfaces, diminue rapidement quand la surface concernée augmente. La mutualisation d'achat des données LiDAR entre différents partenaires, forestiers ou non, ou le regroupement de la révision des aménagements forestiers de forêts publiques sur un même massif, devrait donc permettre, en plus de partager les coûts, d'étendre la méthode présentée dans ce démonstrateur à d'autres sites des régions forestières « dunes littorales » ou « plateau landais ».

Ce démonstrateur a été réalisé à partir des données LiDAR à « forte densité » (en moyenne presque 20 points émis par m²) ce qui peut expliquer en partie les bons résultats obtenus. Cependant d'autres études conduites par le département RDI ont atteint des résultats similaires avec des densités plus faibles, de l'ordre de 10 à 12 points émis par m². En dessous de 6 points par m², il n'est pas

possible de réaliser certaines analyses comme l'identification des couronnes d'arbres et les erreurs de prédiction s'en trouveront augmentées. L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), quant à lui, acquiert des données LiDAR à faible densité (entre 0,5 et 2 points par m²) mais pour un objectif essentiellement topographique : la rénovation du MNT du Référentiel à Grande Échelle (RGE). Ces données pourraient éventuellement se prêter à la modélisation des paramètres forestiers mais avec une moindre qualité, que nous n'avons pas pu évaluer dans le cadre du démonstrateur, le calendrier prévu par l'IGN sur ce site ayant été décalé. Quoi qu'il en soit, ces données n'ont pas vocation à être renouvelées fréquemment (puisque un MNT est relativement stable dans le temps) et deviennent rapidement obsolètes du point de vue forestier (croissance des peuplements, coupes de bois, etc.).

Au-delà des très bons résultats obtenus sur ce site, les travaux de recherche, notamment ceux du département RDI, se poursuivent sur plusieurs fronts.

- Améliorer les modèles de prédiction des paramètres forestiers afin de les rendre plus génériques et robustes. Le point faible de la méthode réside en effet dans le manque de généralité des modèles statistiques de prédiction, à l'exception notable de la hauteur dominante. Ces modèles sont établis de façon empirique au sens où, pour chaque site et chaque

Type d'inventaire	Cartographie (description)							Estimation (diagnostic) à l'échelle				
	Limite peuplement	Limite versant abrupt	Desserte forest.	H0 Dg	G V	N	Essences	<Parcelle..... >				Bloc ou forêt (G, V)
								H0, Dg	G, V	N	Essences	
Inventaire à partir des données LiDAR	++	++	+	++	+	-	/	++	+	-	/	++
Inventaire-diagnostic (protocole local)	/	/	/	-	-	-	-	≈	≈	≈	≈	++
Inventaire-description (protocole labélisé national)	+	/	/	≈	≈	≈	≈	-	-	-	-	+

Fig. 12 : Comparaison des méthodes d'inventaire ++ très bon + bon ≈ moyen - mauvais /non réalisé *

* nécessite des analyses complémentaires non intégrées dans le protocole.

variable étudiée, il faut refaire la sélection statistique (et la combinaison) des indicateurs LiDAR les plus pertinents. Ce travail nécessite une connaissance approfondie des méthodes statistiques et semble, dans l'état actuel des compétences, difficilement transférable vers les services opérationnels. L'identification de nouvelles formes de modèles reposant sur un nombre d'indicateurs LiDAR restreint et ne nécessitant plus de phase d'étude statistique spécifique, permettrait de faciliter et formaliser leur conception et d'amorcer ainsi le transfert vers un réseau de compétences constitué de personnels spécialisés.

- Développer des outils intégrés permettant de réaliser facilement plusieurs étapes de la chaîne de traitement comme l'extraction des placettes LiDAR, le calcul des indicateurs et la cartographie.
- Identifier les essences forestières en utilisant les données LiDAR mais aussi d'autres sources de télédétection (ortho-photographie infrarouge couleur, images satellite...).
- Modéliser les paramètres forestiers à partir d'autres sources de télédétection, comme par exemple les photos aériennes à partir desquelles il est possible de générer, par la photogrammétrie, un modèle numérique de hauteur à condition de disposer d'un MNT précis. Après une première acquisition LiDAR permettant d'obtenir ce MNT, l'intérêt serait alors d'obtenir des données pour l'actualisation des prédictions de paramètres forestiers, avec un coût inférieur à celles issues du LiDAR aéroporté et avec une fréquence d'acquisition plus élevée.

La qualité des résultats obtenus par cette technique reste encore à évaluer.

Alain MUNOZ

ONF, pôle RDI Chambéry
(alain.munoz@onf.fr)

Didier CANTELOUP

ONF, agence Landes
Nord-Aquitaine

Anne JOLLY

ONF, pôle RDI Nancy

Catherine RIOND

ONF, pôle RDI Chambéry

Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil Régional d'Aquitaine qui a participé au financement de l'acquisition des données LiDAR ayant permis la réalisation de ce projet.



Bibliographie

Bock J., Renaud J. P., Dez G., Martins F., Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey, J. L., 2011. Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, n° 32, pp. 39-44

Monnet J.M., Munoz A., 2016. Comparaison de méthodes de spatialisation pour l'agrégation par parcelle des estimations de paramètres forestiers par LiDAR aéroporté. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, à paraître.

ONF, 2013. NDS -13-D-365 du 10 avril 2013 : Inventaires dendrométriques, diagnostics sylvicoles et descriptions pour l'aménagement forestier : cadrage national pour la définition des stratégies territoriales. 5p.+annexes

Munoz A., Viard-Cretat G., Fay J., 2013. Implantation d'un projet de desserte forestière en forêt de montagne : les apports du Lidar aérien. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, n° 39-40, pp. 39-44

Munoz A., 2014. Le positionnement par satellite : les nouveaux récepteurs améliorent-ils les performances sous couvert forestier ? *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, n° 43, pp. 54-62

Munoz A., Bock J., Monnet J.M., Renaud J.P., Jolly A., Riond C., 2016. Évaluation par validation indépendante des prédictions des paramètres forestiers réalisés à partir de données LiDAR aéroporté. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, à paraître.

Sardin T., 2009. Guide des sylvicultures – Forêts littorales atlantiques dunaires. ONF ed, 175p.

White J. C., Wulder M. A., Varhola A., Vastaranta M., Coops N. C., Cook B. D., Doug P., Woods M., 2014. Guide des meilleures pratiques pour générer des attributs d'inventaire forestier provenant de données obtenues par balayage laser aéroporté en utilisant une approche par zones. *Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Le Centre canadien sur la fibre de bois, Victoria, C.-B. Rapport d'information FI-X-010*, 44p.

Expérience pratique de la réalisation du projet démonstrateur « LiDAR forestier »

En contrepoint à l'évaluation méthodologique de l'article précédent, nous avons sollicité le témoignage d'un des protagonistes de l'équipe locale. Impliqué dans ce démonstrateur à plusieurs titres, il intervient en particulier en tant que chef de projet aménagement pour l'une des deux forêts concernées. Un exemple de premier aménagement forestier d'autant plus exigeant qu'il concerne le site des « Dunes et forêts du Porge », récemment acquis par le Conservatoire du Littoral.

Le choix d'un vaste ensemble de forêts dunaires comme premier démonstrateur d'un projet « LiDAR forestier », en 2014, résulte d'une heureuse conjonction de circonstances.

L'origine du projet démonstrateur « LiDAR forestier » en forêts littorales

Installée sur la flèche sableuse du Cap Ferret qui ferme le Bassin d'Arcachon, la forêt domaniale de Lège est engagée dans une démarche de labellisation Forêt d'Exception®, dont le comité de pilotage souhaitait pouvoir appréhender pleinement le patrimoine paysager et la biodiversité des écosystèmes, avec entre autres l'objectif d'une gestion fine des dépressions humides interdunaires. Il lui fallait par conséquent une connaissance précise de ce territoire remarquable et il commençait à s'intéresser à ce que le LiDAR avait pu apporter dans d'autres sites du réseau Forêt d'Exception®. Dans le même temps, l'aménagement forestier arrivait à expiration et devait être révisé, en s'appuyant notamment sur un inventaire « classique » par échantillonnage.

Parallèlement, le Conservatoire du littoral venait d'acquérir fin 2013 la forêt privée riveraine, en lui donnant le nom de site des « Dunes et forêts

du Porge ». Cette acquisition avait notamment bénéficié d'une aide financière de la Région Aquitaine, sous conditions, en particulier, (1) d'une gestion multifonctionnelle exemplaire, adaptée au changement climatique, et (2) de l'expérimentation de techniques innovantes. Faute d'avoir pu obtenir les documents de gestion de l'ancien propriétaire, le Conservatoire ne disposait que d'un Plan Simple de Gestion squelettique du type règlement d'exploitation des coupes de régénération... avec indication approximative de l'année d'installation des peuplements existants ; il a donc été nécessaire de vérifier cette information d'après une série de photos aériennes anciennes. Pour établir un plan de gestion à la hauteur des enjeux, une connaissance détaillée et complète du milieu et des peuplements s'imposait.

Les services ONF concernés, à savoir l'agence Landes Nord-Aquitaine et l'agence Études de la Direction Territoriale Sud-Ouest, étaient déjà sensibilisés aux applications possibles du LiDAR en matière de caractérisation et cartographie de la ressource forestière. Ils ont vu là l'opportunité de monter un projet LiDAR ambitieux : une opération couvrant les deux forêts et permettant de tester l'inventaire LiDAR en conditions réelles, avec la possibilité

d'une évaluation par comparaison avec l'inventaire statistique classique. Le projet était susceptible de subvention en vertu d'une convention cadre passée entre l'ONF et la Région Aquitaine pour la mise en valeur de la gestion forestière et des produits issus de la forêt littorale.

C'est pourquoi les porteurs du projet se sont rapprochés du pôle Recherche, Développement et Innovation de Chambéry qui, de son côté, commençait à rechercher des sites démonstrateurs...

Retour d'expérience du chef de projet aménagement pour le site du Conservatoire

Un long dialogue avec un propriétaire assez particulier

Il a d'abord fallu bien expliquer au Conservatoire, peu familier de la gestion forestière, quels sont les principes et objectifs généraux de l'aménagement forestier durable et multifonctionnel (nécessité du renouvellement et d'un certain équilibre des classes d'âge, planification des interventions sylvicoles, en travaux dans les stades juvéniles puis par éclaircies...) et quelles sont les particularités de la gestion sylvicole des pinèdes sur les dunes littorales : assurer le renouvellement par la régénération naturelle, laisser hors sylviculture les milieux

à la fois très contraignants et très singuliers, comme la frange littorale, les pentes abruptes...

Il a fallu aussi, pour le forestier, bien écouter les attentes du Conservatoire, sachant que ses priorités sont sensiblement différentes de celles de la forêt domaniale, afin d'adapter au mieux les choix de cet aménagement particulier.

Pour le Conservatoire, en effet, la priorité est la préservation des paysages et de la biodiversité, dans des espaces destinés à être ouverts au public. Fort de cet objectif assigné par la loi, et malgré son adhésion à l'approche multifonctionnelle, il avait tendance à rejeter le principe des exploitations – et par là-même la fonction de production – en réaction aux propositions de l'ONF, perçu comme un simple « marchand de bois ». Or l'exploitation n'est pas seulement le moteur de la filière bois régionale (un enjeu qu'un propriétaire forestier public d'une telle consistance ne peut pas méconnaître en Aquitaine), c'est aussi un moyen de contribuer à la diversité biologique et paysagère. De plus,

sa vision quelque peu idéalisée d'un écosystème forestier littoral mature à dominante feuillue correspondait assez mal aux réalités du terrain. Au fil des discussions, le curseur de l'équilibre des fonctions attendues et nécessaires, et des objectifs sur le long terme pour cette forêt, a pu se stabiliser sur une position partagée.

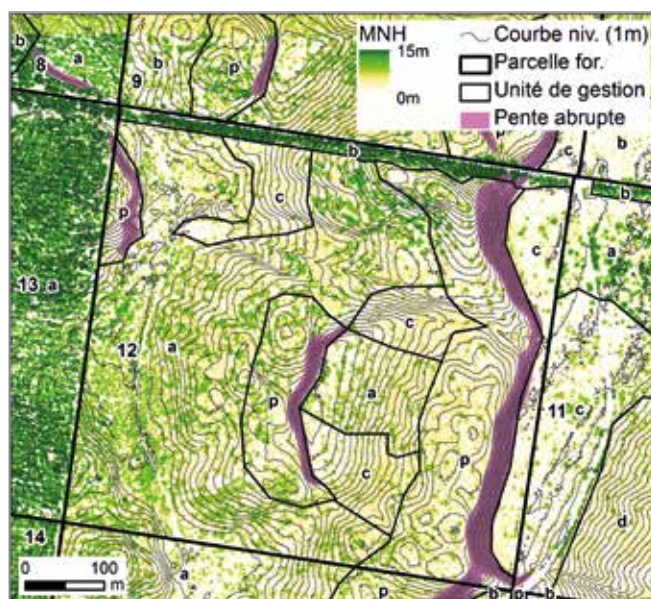
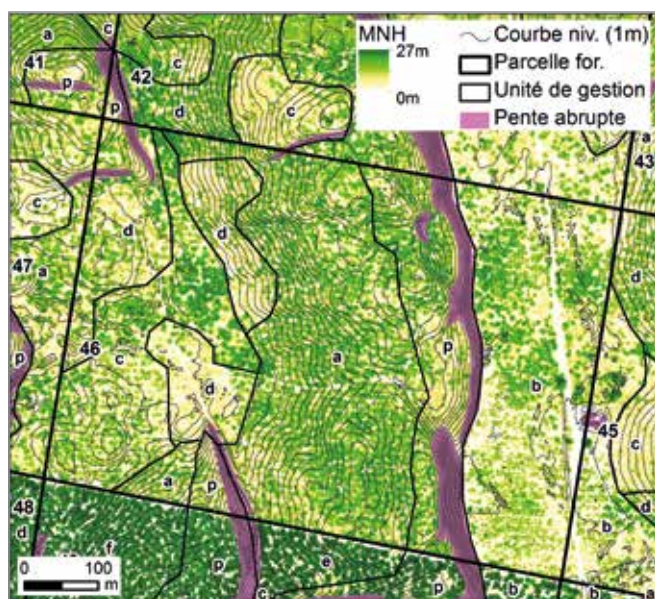
Cependant, l'utilité de la caractérisation dendrométrique des peuplements principaux pour le classement des parcelles, la programmation des interventions, les prévisions de récolte, échappait au Conservatoire, peu enclin à agir dans les peuplements, sauf à vouloir connaître d'emblée et en priorité la quantité de bois mort ou la présence de sous-bois et sous-étage feuillus. Aussi, il a fallu expliquer ce qu'était l'inventaire forestier « classique », ses avantages et ses limites, les avancées que permettait un inventaire LiDAR, l'intérêt d'en explorer les possibilités, et la nécessité de hiérarchiser la façon d'appréhender la connaissance des milieux ligneux (d'abord la canopée puis le sous-bois, d'abord le bois vert puis le bois-mort avec un autre type d'inventaire...).

L'ancien propriétaire avait géré sa forêt pour la production de bois via des coupes rases dont la régénération était plus ou moins réussie et pour les revenus de la chasse de cet espace entièrement clôturé. On désirait passer de cette gestion privative intensive à une gestion extensive d'un bien public. Le projet de couverture LiDAR est apparu à tous comme une excellente opportunité pour décrire ce territoire mal connu qu'il fallait restaurer.

Les avantages de l'inventaire LiDAR

Les premiers résultats dérivés du LiDAR et utilisables pour les reconnaissances de terrain ont été le MNH et le MNT, qui ont permis une cartographie extraordinaire, combinant respectivement la représentation de la hauteur des arbres et celle du relief par des courbes de niveau à très faible équidistance (voir figure).

Grace à cette cartographie très précieuse des peuplements, et à une vérification sur le terrain, nous avons pu faire une sorte de « photo-interprétation » qui nous a permis d'appréhender la diversité des



Cartographie combinant hauteurs des arbres (MNH en vert), courbes de niveau (à équidistance de 1 mètre, en gris) et traitement distinguant les pentes abruptes (> 30 %, en violet)

Elle permet, avec une reconnaissance sur le terrain, de délimiter des unités homogènes : à gauche, exemple de peuplement d'âge moyen ; à droite, exemple de peuplement plus jeune avec les landes plus ou moins arborées. Remarquer la délimitation de corridors pour la biodiversité au sommet des pentes abruptes (unités de gestion « p »)

situations souvent corrélées au relief dunaire avec ses versants, ses replats inter-dunaires (les « lettres »), ses bas de pentes et ses sommets. Nous avons pu identifier les zones d'anciens échecs de régénération constituant désormais des landes plus ou moins arborées. De même les îlots de feuillus, variables en étendue, se détachent assez bien par leurs plus faibles hauteurs au sein des pinèdes, ce que des orthophotos infrarouge permettent par ailleurs de confirmer. Ainsi nous avons pu faire une délimitation rapide d'unités élémentaires de description (UED), correspondant à des types de peuplement, que nous avons regroupées par la suite, en fonction des interventions sylvicoles à opérer, en unités de gestion (UG).

Un traitement du MNT a permis de délimiter automatiquement, et bien plus précisément que ne le permettrait le MNT de l'IGN, les revers dunaires abrupts dont la pente trop forte interdirait toute mécanisation et qui se prêteraient donc difficilement à la sylviculture. Les milieux correspondants, laissés en libre évolution, présentent potentiellement une biodiversité et une naturalité intéressantes. Ces pentes correspondent au versant est des dunes, globalement organisées en « cordons » parallèles au littoral, et forment ainsi des chapelets d'îlots de peuplements voués à la sénescence. Le Conservatoire a souhaité conforter et amplifier cette trame pour former des corridors de biodiversité. Grâce aux courbes de niveau, nous avons pu délimiter, en prenant les sommets des pentes raides, d'importantes zones de naturalité à mener jusqu'à la sénescence (voir figure). De plus, le propriétaire étant désireux d'augmenter le nombre de points d'eau en creusant des mares, nous avons fourni l'emplacement des points bas répartis sur toute la forêt et susceptibles d'être aménagés.

L'utilisation des caractéristiques dendrométriques prédites par les modélisations est intervenue une fois les délimitations des UED et des UG



Didier Camteloup, ONF

Zone de Lande arborée

faites. La plus utilisée a été la hauteur dominante (H_0) car, couplée à l'âge indiqué précisément par l'année de la coupe rase, elle détermine la classe de fertilité. Celle-ci est la principale entrée dans les référentiels du guide de sylviculture des forêts littorales atlantiques dunaires, ce qui permet de planifier les interventions sylvicoles.

La hauteur dominante a été estimée pour chaque UG par le calcul de la moyenne et du coefficient de variation afin de s'assurer de l'homogénéité en fertilité de l'UG. Les prévisions de récoltes pour chaque UG du groupe de régénération ont été calculées à partir du volume modélisé à l'aide des données LiDAR augmenté d'un accroissement moyen estimé sur la durée jusqu'au passage en coupe rase. Les cartographies en continu d'autres variables dendrométriques (G , D_g , V_u ...), ont été à ce stade moins utilisées. Elles figurent cependant dans le document de gestion et devraient aider à établir des directives de martelage et à moduler ainsi les éclaircies en fonction des hétérogénéités du peuplement identifiables au sein de chaque UG.

Les limites du LiDAR

En définitive, le LiDAR est un moyen d'investigation exceptionnellement riche en informations, issues seulement d'un unique nuage de points en 3 dimensions, très satisfaisant pour l'aménagiste avec cependant quelques limites.

Comme pour l'inventaire classique, qui exclut les jeunes peuplements de l'unité d'inventaire, nous ne disposons pas avec le LiDAR d'une estimation de densité des tiges (N/ha) suffisamment précise pour les stades juvéniles. Cette information, indispensable pour programmer les dépressages et premières éclaircies, ne reste accessible que par des diagnostics supplémentaires et ciblés.

La lacune principale du LiDAR par rapport à l'inventaire par placettes statistiques, réside dans l'impossibilité de recueillir des informations sous la canopée des pins. Cela concerne notamment la nature et l'importance du sous-bois, de la régénération et du sous-étage, tout ceci pour connaître les potentialités des feuillus afin de pouvoir développer une pinède plus mélangée.

Quelques remarques générales sur la mise en œuvre du démonstrateur

En faisant le bilan du projet et des perspectives pour la suite qu'il conviendrait de lui donner, plusieurs réflexions émergent.

La nécessité de la rigueur lors des phases de terrain

Les mesures sur les placettes de calibration puis de validation (voir l'article précédent) exigent de respecter le protocole avec une grande rigueur, au risque, en cas d'erreur de prise de données, d'avoir des modèles de prédiction des variables dendrométriques faux et/ou imprécis. La qualité des données de calibration et de localisation des placettes est fondamentale. Par commodité, et pour assurer le contrôle de cette phase essentielle de calibration, ces mesures ont été faites par l'équipe projet LiDAR constituée des deux spécialistes de l'agence Études (un chef de projet complexe et un géomaticien). Ainsi nous n'avons pas évalué les difficultés éventuelles pour des agents de terrain à réaliser cette opération proche d'un inventaire par placettes mais pour laquelle une vigilance absolue doit s'exercer. De fait, cette étape initiale n'a pas été portée à la connaissance vécue d'une équipe de terrain. En revanche,

pour les placettes de validation, nous avons constitué des équipes mixtes, composées d'un spécialiste et d'un agent de terrain. Le spécialiste, connaissant parfaitement le protocole et les conséquences d'écarts à son exécution, l'applique avec toute la rigueur possible, assisté par le personnel de l'UT dont la connaissance du terrain est un sérieux atout, pour les déplacements notamment. Cette formule mixte nous semble avoir l'avantage de garantir une qualité minutieuse tout en impliquant le terrain dans le processus.

Mieux évaluer les coûts d'inventaire statistique

Dans un aménagement forestier, la phase d'inventaire représente souvent le coût le plus important. Or celui-ci est mal connu par manque de suivi spécifique du temps passé sur cette tâche et peut varier fortement en fonction des milieux parcourus (plaine/montagne, feuillus/résineux...). Pour le projet démonstrateur, l'équipe LiDAR a fait un suivi individualisé des différentes étapes en ne retenant que le temps consacré au projet opérationnel (et donc en excluant le temps de formation à ce nouvel outil spécialisé). Exceptionnellement, le temps passé par les agents à l'inventaire statistique de la forêt de Lège-et-Garonne a été

suivi et traduit en coûts. Il serait utile de faire ce suivi de temps en routine pour mieux connaître la charge que cela représente pour le terrain, afin d'établir des comparaisons plus fiables entre les deux types d'inventaires (et plus généralement dans un souci d'amélioration continue de l'aménagement).

L'importance de l'appropriation par le terrain d'une méthode fantastique

Au premier abord, cette nouvelle technologie a quelque chose d'incroyable et de quasiment magique : comment, à partir de la silhouette d'arbres sur de grands espaces, peut-on prédire autant de caractéristiques dendrométriques si précises et avec si peu de placettes, alors qu'il faut de longs inventaires de terrain pour estimer les mêmes caractéristiques de manière moins fine ? Le forestier sera tenté, pour éprouver la méthode, de vérifier l'exactitude des résultats (prédictions) du LiDAR sur tel ou tel exemple ; il pourra être conquis ou au contraire déçu en cas d'écart ponctuel. Pour éviter l'emballement excessif ou le rejet des résultats issus du LiDAR, il est nécessaire de le démystifier, d'en expliquer les principes et les limites, d'impliquer les agents de terrain pour leur faire comprendre qu'en matière dendrométrique, le LiDAR est aveugle si on ne l'étalonne pas avec des mesures très précises sur des zones bien choisies, et de montrer qu'une énorme phase de calcul par des spécialistes est nécessaire dans cette chaîne de traitement conjuguant de multiples compétences. En effet, au-delà du démonstrateur, le déploiement opérationnel du LiDAR forestier nécessitera du personnel formé, organisé probablement en un réseau de compétence, alliant agents territoriaux de terrain et de bureau, et experts nationaux spécialisés dans les traitements.



Didier Canteloup, ONF

Sous-bois d'arbousier

Didier CANTELOUP

Expert national pin maritime
ONF, agence Landes
Nord-Aquitaine

Utiliser un outil expérimental dans la gestion courante : les enclos-exclos pour évaluer l'équilibre forêt-gibier

L'ONF déploie une nouvelle génération d'enclos-exclos répondant à un cahier des charges à la fois simple et rigoureux qui en fait, dans un esprit de gestion adaptative, un véritable outil pour évaluer l'équilibre forêt ongulés à court et moyen terme. Comment? Quelle différence avec les anciens types d'enclos? Cet article donne à comprendre. Les questions de logistique (et coûts) d'installation, en revanche, n'y sont pas abordés.

Préambule

Arrêtons-nous un moment sur le mot « expérience ». Dans le sens commun, l'expérience est ce que l'on sait, ce que l'on a acquis par les apprentissages de la vie. Concernant les effets du gibier sur la forêt, les forestiers ont leur expérience de la gestion forestière (récolte des arbres, croissance des peuplements, régénération...) et les chasseurs ont leur expérience de la gestion des populations animales (tirs, comportements, conditions de rencontre...); l'un n'excluant pas l'autre. Lorsqu'ils se trouvent face à une même image (par exemple des dégâts), face à une décision à prendre (par exemple un plan de chasse à chiffrer), chacun s'inspire de son *expérience* pour livrer son avis et faire valoir son point de vue. Il s'agit là de l'expérience dite *première*, au sens où elle est n'est pas assortie de données *objectives*. Lorsque les points de vue s'opposent, le recours à l'*expérience scientifique* s'impose pour établir des faits, et s'affranchir de toute subjectivité. C'est la démarche que nous proposons à travers l'utilisation des enclos-exclos pour l'évaluation de l'équilibre forêt-gibier.

Introduction

Dans une expérience scientifique, on définit classiquement deux types de variables : une variable dite *réponse*,

notre cible d'intérêt, et une (ou plusieurs) variable(s) dite(s) *explicative(s)*, celle(s) dont on veut étudier les effets. La question posée est alors « la variable explicative a-t-elle un effet sur la variable réponse ? ». L'expérience consiste à faire varier la variable *explicative*, et observer la réaction de la variable *réponse*.

Dans une expérience pharmaceutique, la question classique est « la prescription de tel médicament a-t-elle un effet sur la guérison de telle maladie ? ». Pour cela on administre le médicament à diverses doses à des populations, une des populations ne recevant aucune dose pour constituer le « témoin ». Puis on suit la guérison, caractérisée par divers paramètres tels que le taux et la rapidité.

Si l'on transpose la situation à celle de la forêt et des ongulés, la question devient « les populations de gibier ont-elles un effet sur la régénération de la forêt ? ». De même, l'expérience scientifique consiste à faire varier les niveaux de populations dans le milieu, une des modalités étant l'exclusion des ongulés. Techniquement, il s'agit de l'enclos, qui sert de « témoin » ; on mesure alors régulièrement la régénération de la forêt, caractérisée par divers paramètres tels que le nombre de tiges, les essences, la croissance en hauteur.

Des enclos à portée démonstrative, parfois nommés « enclos-témoins » (Picard *et al.*, 1988) ont été installés à de nombreuses reprises par le passé (premiers cadrages ONF en 1988), comme en témoignent les quelques exemples de la figure 1. Les deux premières images (A et B) présentent des enclos démonstratifs, installés pour être observés occasionnellement, afin de témoigner (d'où le glissement sémantique vers « l'enclos-témoin ») de ce que serait le milieu en l'absence de grands animaux. Si l'image est toujours saisissante, elle ne permet guère (peu de données) d'attester de l'état initial et de caractériser la dynamique depuis l'implantation de l'enclos. Les trois photos suivantes (C à E) sont celles des enclos implantés en 1979 en FD Arc-en-Barrois dans le cadre d'un programme de recherches de l'INRA explorant les effets du cerf sur les communautés végétales, nécessitant des mesures fines sur la végétation (Allain *et al.*, 1978). Enfin, sur l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers), un enclos protège la zone centrale de la placette (1/2 ha) où se trouvent les matériels de mesure (F); les chercheurs et botanistes relèvent régulièrement la composition de la flore de part et d'autre de l'enclos (Archaux *et al.*, 2009).

La comparaison enclos-exclos est désormais une méthode standard pour étudier les effets des ongulés sur les composantes et le fonctionnement des écosystèmes (Waller *et al.*, 2009). Pour en tirer le meilleur, il est cependant nécessaire de bien définir les objectifs qu'on assigne à ces dispositifs car ils sont déterminants quant aux suivis mis en œuvre (type de mesure, compartiments mesurés, fréquence des mesures) et à l'échantillonnage associé (Mårell *et al.*, 2012). Ainsi, l'outil enclos-exclos n'est pas un objet innovant en soi ; en revanche, l'utilisation que nous en proposons, dans le cadre de la gestion courante des forêts et à des fins d'évaluation des impacts des populations de gibier sur les régénérations forestières, constitue une avancée marquante par rapport au rôle démonstratif qui leur était jusqu'alors assigné.

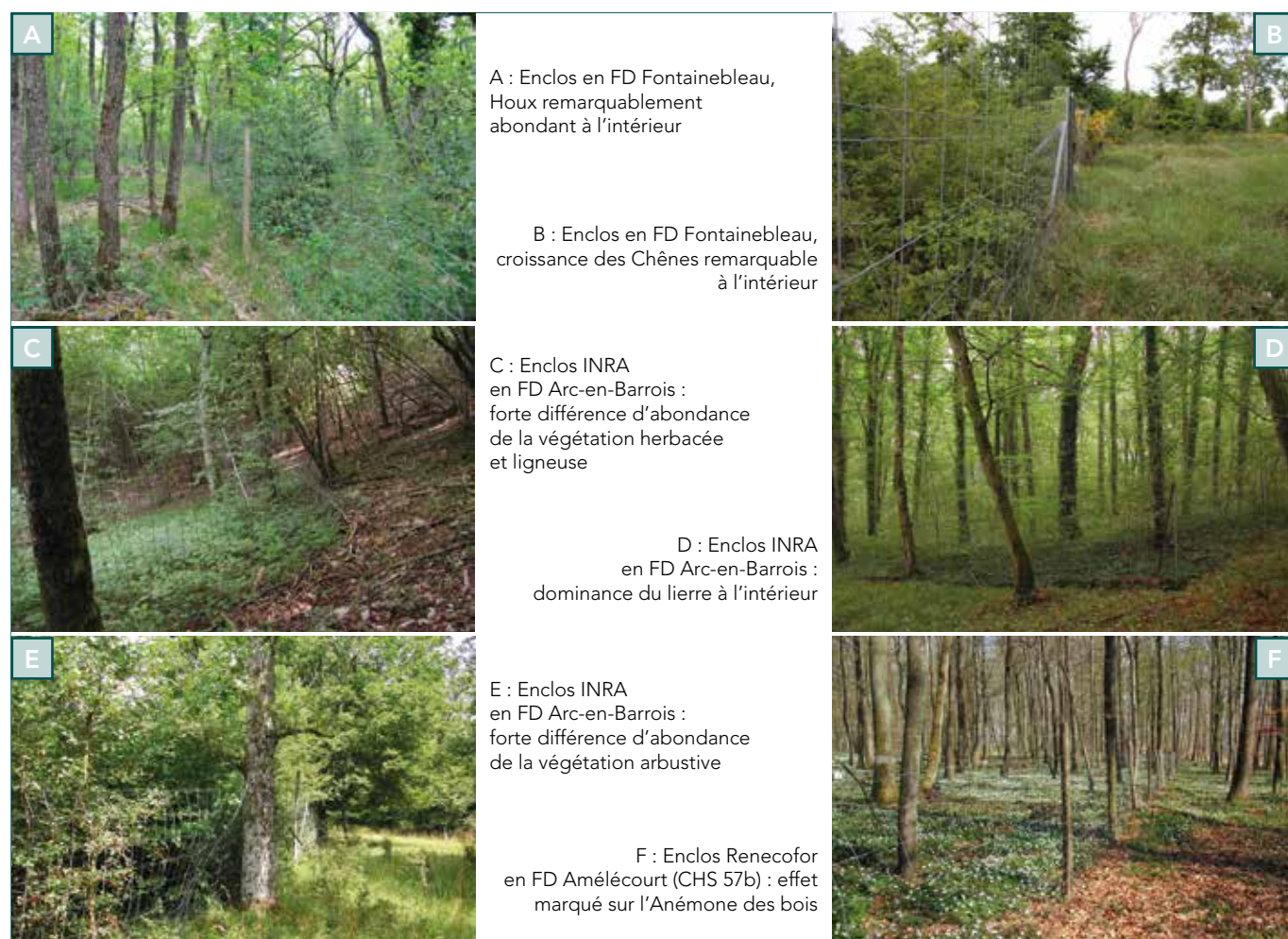
De l'estimation des populations à la gestion adaptative

Historiquement, les travaux de recherche visaient à estimer la ressource chassable. Il s'agissait d'une part de trouver des méthodes d'estimation numérique des populations (approche-affut combiné, abroustissement, etc.) et d'autre part de connaître le fonctionnement des dites populations (reproduction, état sanitaire). Cette estimation du nombre d'animaux qu'il était possible de prélever était alors employée comme un des éléments dans la négociation du plan de chasse.

Or, les travaux de recherche scientifique ont montré qu'en forêt, il est presque impossible d'estimer les effectifs des populations avec un bon niveau de confiance, c'est-

à-dire avec une précision suffisante pour être pertinent en gestion et sans biais. Dès 1953, les chercheurs danois mettent en évidence que les méthodes d'estimation des populations sous-estiment très nettement les populations réelles (Andersen *et al.*, 1953). Plus récemment, des recherches mettant en œuvre des techniques plus pointues ont, elles-aussi, conduit à la même conclusion (voir la synthèse dans Boulanger, 2010). Face à ce constat, les travaux de R&D sur la gestion du grand gibier ont abandonné l'idée de pouvoir gérer *a priori* les populations et ont conduit la transition vers une stratégie de gestion adaptative.

Les principes et la mise en œuvre de la gestion adaptative ont déjà été exposés et discutés dans la littérature technique forestière (Cordonnier et



Vincent Boulanger et Anne-Marie Granet, ONF

Fig. 1 : six exemples d'enclos

Gosselin, 2009). Si des limites ont clairement été identifiées, ce cadre méthodologique se prête bien à la gestion du grand gibier. Transcrit au cas précis de la gestion de l'équilibre sylvo-cynégétique, ce schéma se déroule en 4 temps, comme indiqué sur la figure 2. Il repose sur l'utilisation et le suivi d'indicateurs permettant d'évaluer l'atteinte des objectifs fixés initialement. À ce jour, les gestionnaires de la grande faune ont, en lien avec la recherche, développé et validé des Indicateurs de Changement Écologique (ICE) permettant de suivre quelques paramètres clé des populations et de leur habitat (ONCFS, 2015). Ces ICE renseignent les variations de trois grands types de paramètres : l'abondance des populations, les qualités et performances des individus et la pression exercée sur le milieu.

Toutefois les deux indicateurs de pression sur le milieu (indice de consommation et indice d'abrutissement) ne donnent aucune information quant aux impacts des populations de gibier sur la régénération forestière. Or c'est sur ce stade critique du cycle sylvicole que les impacts de populations de gibier sont susceptibles de compromettre les objectifs de gestion durable de la forêt. Pour construire un système de gestion adaptative performant et complet, satisfaisant

les attentes de tous les partenaires, il était donc nécessaire de mettre au point des outils et indicateurs rendant compte des effets des ongulés aux régénérations forestières et permettant de juger du niveau des impacts (Klein *et al.*, 2015).

Évaluer les impacts par comparaison enclos-exclos

L'enclos doit être vu comme un témoin au sens expérimental, une référence sur laquelle baser l'évaluation (Mårell *et al.*, 2015). Le schéma de la figure 3 formalise le cadre conceptuel associé à la comparaison enclos-exclos. L'état du système (la régénération forestière) dans l'enclos ne constitue pas l'objectif ou l'état à atteindre mais une référence à laquelle on va comparer l'état à l'extérieur, en présence d'ongulés. La phase de planification consiste donc, pour les gestionnaires à s'entendre sur l'objectif à atteindre, formalisé en un seuil d'acceptabilité des effets des ongulés sur la régénération forestière. Selon les situations, la pondération des enjeux cynégétiques et sylvicoles est différente et pourra justifier que ce seuil d'acceptabilité soit plus ou moins élevé. À titre d'exemple, le guide associé à la note de service du les enclos-exclos (ONF, 2015) propose comme seuil d'acceptabi-

lité standard un écart de 20 % entre la croissance (ou densité) des tiges de l'essence objectif entre enclos et exclos, et un seuil de 50 % pour juger une situation très dégradée.

Alors que dans le cas des ICE ce sont les tendances (augmentation/stabilité/diminution) qui rendent compte des évolutions des populations de cervidés, les suivis de couples enclos-exclos permettent aussi une évaluation quantitative et une estimation directe des effets des populations de grand gibier sur la régénération forestière. L'obtention de ces informations, avec toute la fiabilité requise, suppose que la régénération fasse l'objet de mesures régulières selon un protocole *ad hoc* et que l'installation des dispositifs enclos-exclos respecte un certain nombre de conditions.

Des conditions d'installation déterminantes !

Revenons à la métaphore médicale évoquée en introduction. Lorsqu'on administre une molécule, ou autre composant, à des patients malades et qu'on observe la réponse de leur état de santé, l'effet étudié est l'*effet curatif* de ce qu'on leur a administré (typiquement : un médicament). Si au contraire, les patients traités étaient

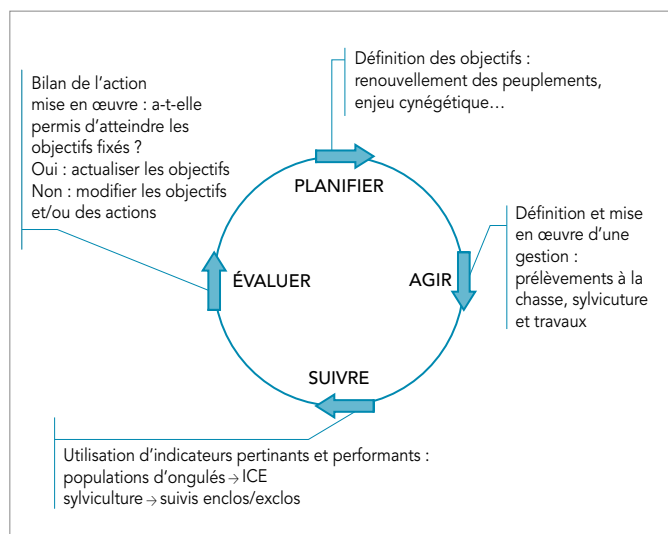


Fig. 2 : schéma de la gestion adaptative, décliné au cas de l'interaction forêt-gibier (inspiré de Cordonnier et Gosselin, 2009)

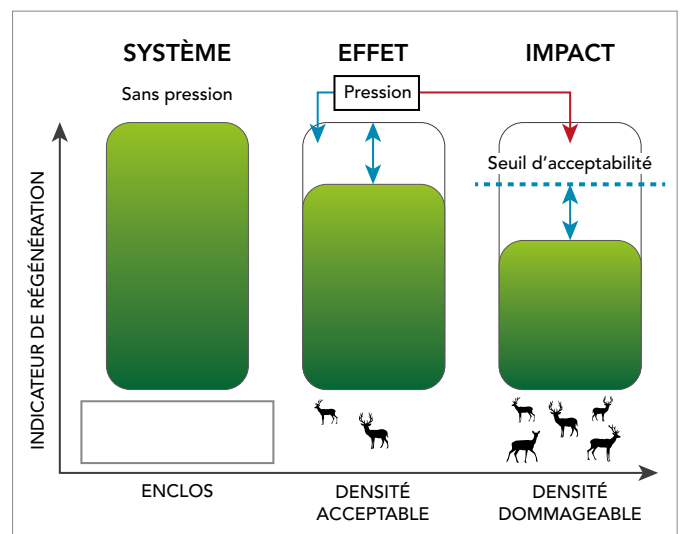


Fig. 3 : schéma de définition des effets et des impacts des ongulés sur la régénération forestière (inspiré de Mårell *et al.*)

initialement en bonne santé, et qu'on observe la réponse de leur état de santé, l'effet étudié est l'*effet préventif*, par exemple dans le cas d'un vaccin.

Transposé au cas de nos enclos-exclos, il faut s'interroger sur l'état de la végétation sur laquelle un dispositif enclos-exclos sera implanté. *Dans le cas où la végétation est soumise depuis longtemps à la pression des ongulés*, l'exclos servira de témoin du milieu en conditions standard (avec les populations d'ongulés circulant librement), tandis que l'enclos constitue la modalité soumise à un traitement particulier (la végétation est soustraite à la pression des ongulés). Les paramètres suivis dans l'enclos permettront de quantifier et/ou qualifier la restauration de l'écosystème suite à la suppression des ongulés (et donc de tous leurs effets, directs et indirects).

Dans le cas où la végétation n'a pas encore été impactée, au premier stade de la régénération forestière par exemple (quoiqu'on puisse également évaluer l'effet de prédation sur les graines en implantant les dispositifs plus précocement), l'enclos sert de témoin d'une dynamique de développement en l'absence d'ongulés, tandis que l'exclos constitue le traitement, soumis à la pression des ongulés. Les paramètres suivis permettront alors de mesurer l'effet de

cette pression. C'est dans ce cas que les enclos-exclos constituent l'outil idoine pour quantifier les effets des ongulés sur la régénération forestière.

Cahier des charges

La pertinence de l'outil enclos-exclos pour quantifier les effets des ongulés sur la régénération forestière étant démontrée, les conditions de sa mise en œuvre doivent être précisées et adaptées à une application par les gestionnaires pour aboutir à un *outil pleinement opérationnel*.

La régénération des peuplements forestiers est le processus clé de la gestion durable des forêts (assurer le renouvellement des arbres qui sont récoltés). Or c'est à ce stade que la forêt est particulièrement vulnérable aux dégâts des ongulés, c'est donc sur cette phase critique que les enclos-exclos doivent être prioritairement installés. Le gestionnaire forestier se fixe des objectifs de régénération selon quelques paramètres élémentaires : densité de semis, croissance en hauteur pour l'essence qu'il souhaite régénérer majoritairement (dite « essence objectif »). S'ajoute à cela un souhait de favoriser la diversité des essences secondaires et des ligneux dans leur ensemble y compris les arbustes dits « mort-bois », sans valeur marchande. Ce processus de régénération est

bien entendu dynamique, et nécessite donc d'être suivi par des mesures répétées dans le temps.

Le protocole de suivi proposé repose sur un *suivi temporel régulier* (au minimum tous les 3 ans) de quelques *paramètres quantitatifs* simples à relever, afin qu'ils puissent l'être par l'ensemble des agents patrimoniaux, sans requérir de compétence particulière de mesureur ou de spécialité quant à l'observation des dégâts, et en limitant au minimum la charge de travail (temps du relevé). Les quelques retours d'expériences déjà obtenus indiquent un temps de relevé de 30 minutes au plus pour le couple enclos-exclos, hors temps de déplacement. Le géoréférencement de l'emplacement de l'enclos peut permettre de retrouver plus rapidement l'enclos dans une parcelle, *a fortiori* quand la végétation est abondante ; la peinture blanche ou rouge au faîte des piquets est un autre moyen pratique.

Implantation du dispositif : à quel stade sylvicole ?

Pour que la comparaison enclos-exclos permette effectivement de quantifier les effets des grands ongulés sur régénération forestière, il est essentiel que les couples enclos-exclos soient implantés sur une végétation récemment renouvelée, peu ou pas impactée par les ongulés



Fig. 4 : parcelle de chênaie en FD Fontainebleau, couple enclos-exclos implanté après 1^{re} coupe secondaire sur semis acquis

(figure 4). L'installation de ces couples enclos-exclos doit donc intervenir *précocement en phase de régénération* : généralement sur semis acquis (les graines ont germé et les semis semblent bien installés) afin d'évaluer l'effet des ongulés sur l'installation de ces semis, ponctuellement en l'absence de semis pour estimer la consommation des graines ou très jeunes semis. En conséquence, le flux d'installation de ces dispositifs a vocation à suivre les mises en régénération des peuplements. Sous réserve d'accessibilité des sites et de praticabilité des terrains, nous recommandons une installation des enclos-exclos en période hivernale, quand les végétaux sont défeuillés (pour les essences feuillues) et ont stoppé leur croissance.

Implantation du dispositif : densité et positionnement ?

Normalement, chaque parcelle en phase de renouvellement a vocation à être équipée d'un dispositif enclos-exclos. La cible maximale est d'un dispositif par unité de gestion et par tranche de 10 ha. Elle peut notamment se trouver très fortement réduite lorsque la pression des ongulés est si forte qu'elle nécessite un engrillagement total des parcelles pour assurer la régénération.

Au sein d'une parcelle, la localisation du couple enclos-exclos sera déterminée autant que possible aléatoirement (voir le guide technique pour le détail de la procédure). Ceci est essentiel pour garantir que la mesure ne sera pas biaisée en portant sur une situation trop singulière. En cas de forte hétérogénéité de la

régénération, il convient d'abord de rechercher une zone homogène satisfaisant les critères de structure et perturbation de la régénération. Dans le cas de régénérations très hétérogènes (cas de certaines chênaies lorraines par exemple), une autre stratégie d'échantillonnage est à l'étude (voir encadré).

Deux zones de 40 m² (rectangles 4 m x 10 m, voir figure 5) sont ainsi délimitées, et l'enclos sera érigé sur l'une des deux zones ; la zone qui recevra l'enclos doit être déterminée aléatoirement toujours pour éviter de biaiser les conditions initiales.

Les mesures à réaliser

L'objectif premier de ces enclos-exclos est de quantifier les effets des ongulés sur la régénération de l'essence « objectif », définie par le forestier en respect des documents d'aménagement. C'est donc sur cette essence que les mesures seront concentrées. Par ailleurs, le forestier définit classiquement deux stades pour la régénération : les semis d'une hauteur inférieure à 80 cm et les semis dont la hauteur est comprise entre 80 cm et 3 m, pour lesquels des objectifs en densité de semis sont différents. Dans le cas du chêne par exemple, une régénération est considérée comme réussie avec 10 000 semis/ha au premier stade, 2 500 semis/ha au second stade (Jarret, 2004).

Dans l'enclos, comme sur l'exclos, la densité des semis de moins de 80 cm sera estimée sur 4 placettes circulaires (1 m de rayon), limitant ainsi l'effort

de comptage tout en assurant une représentativité satisfaisante (12 m² prospectés -> cible 12 semis). Un tel échantillonnage permet d'estimer les densités dans une gamme valeurs allant de 833 semis/ha à plus de 30 000 semis/ha. Parmi ces semis comptés, la hauteur des 3 plus grands de chaque placette sera mesurée afin d'estimer la hauteur atteinte par les tiges les plus vigoureuses. La régénération à ce stade pouvant aussi être fortement contrainte par la végétation herbacée, l'abondance des espèces concurrentielles (type molinie, fougère aigle etc.) sera estimée pour chaque placette et notée selon une échelle de valeurs allant de 1 à 5.

Lorsque la hauteur de la régénération aura dépassé le seuil de 80 cm, les mesures seront effectuées sur l'ensemble des zones enclos et exclos. Le comptage en plein permet d'estimer, de manière satisfaisante et réalisable techniquement, la densité de tiges dans une gamme allant de 250 tiges/ha à 2500 tiges/ha. Toujours en suivant l'exemple des chênaies atlantiques, en deçà de 1000 tiges/ha (0 à 4 tiges de plus de 80 cm dans 40 m²) la densité est insuffisante (qualifiée de vide anormal) ; la cible de densité (2500 tiges/ha) correspond au comptage des 10 tiges sur une zone de 40 m², au-delà, l'objectif de régénération en densité est atteint. De même, la hauteur des 4 tiges les plus grandes sera mesurée ; proportionnellement, elle représente la hauteur moyenne des 1000 plus grandes tiges à l'hectare et peut donc servir d'indicateur pour estimer la hauteur atteinte par la régénération.

À chaque stade, la présence des essences d'accompagnement (c'est-à-dire autre que l'essence objectif) et des ligneux arbustifs sera relevée afin de fournir des informations quant à la diversité végétale présente dans ces zones en régénération et quantifier l'impact des ongulés sur ce paramètre.

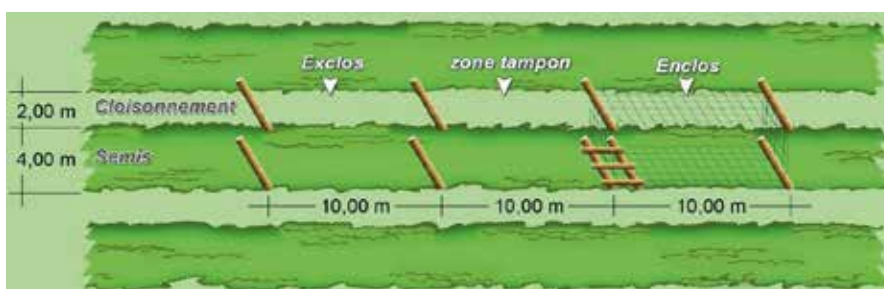


Fig. 5 : schéma d'implantation d'un couple enclos-exclos

Envisager une alternative quand la régénération est trop hétérogène ? (proposition de la DT Lorraine)

Face à des cas de régénérations très hétérogènes spatialement (dégâts de gibier importants, rareté des fructifications), ne permettant pas d'identifier des surfaces de 40 m² comparables pour implanter le dispositif d'enclos-exclos tel que proposé dans le guide associé à la note de service, la direction territoriale Lorraine a proposé un dispositif pour pallier les difficultés. À l'instar du protocole standard, il s'agit de suivre la capacité d'installation des semis et leur croissance.

Ce protocole repose non pas sur la comparaison entre un enclos et un exclos, mais sur celle de 3 enclos avec 6 exclos, les unités échantillonnées étant de plus petite taille (6 m² = 1,38 m de rayon; les enclos ont une surface de 9 m² soit 3 m x 3 m).

Cas du suivi de la capacité d'installation des semis (notamment lorsque la pression de gibier est élevée)

Les 3 enclos et 6 exclos sont mis en place sur un bloc homogène (station, lumière) au sein d'une unité de gestion à régénérer, sur sols nus (avant l'apparition des semis) réceptifs (proximité d'un semencier, lumière disponible) pour suivre la capacité d'installation des semis. Les conditions d'installation doivent être semblables entre les points et les cas de végétation envahissante sont à proscrire. Dans ce cas, les points d'échantillonnage seront choisis sur la base de 3 semenciers du peuplement, sous lesquels 3 points seront matérialisés et l'un sera choisi aléatoirement pour être enclos.

En année n, le relevé ne portera que sur la présence de graines au sol et de semis ou tiges de ligneux d'accompagnement. Cette mesure sera conduite immédiatement après l'installation des dispositifs. Après 3 années de végétation (n+3) le relevé portera sur la présence de semis d'au moins 1 an (par essence afin d'estimer la diversité) et la mesure de hauteur des 3 semis les plus grands de chaque placette pour l'essence objectif.

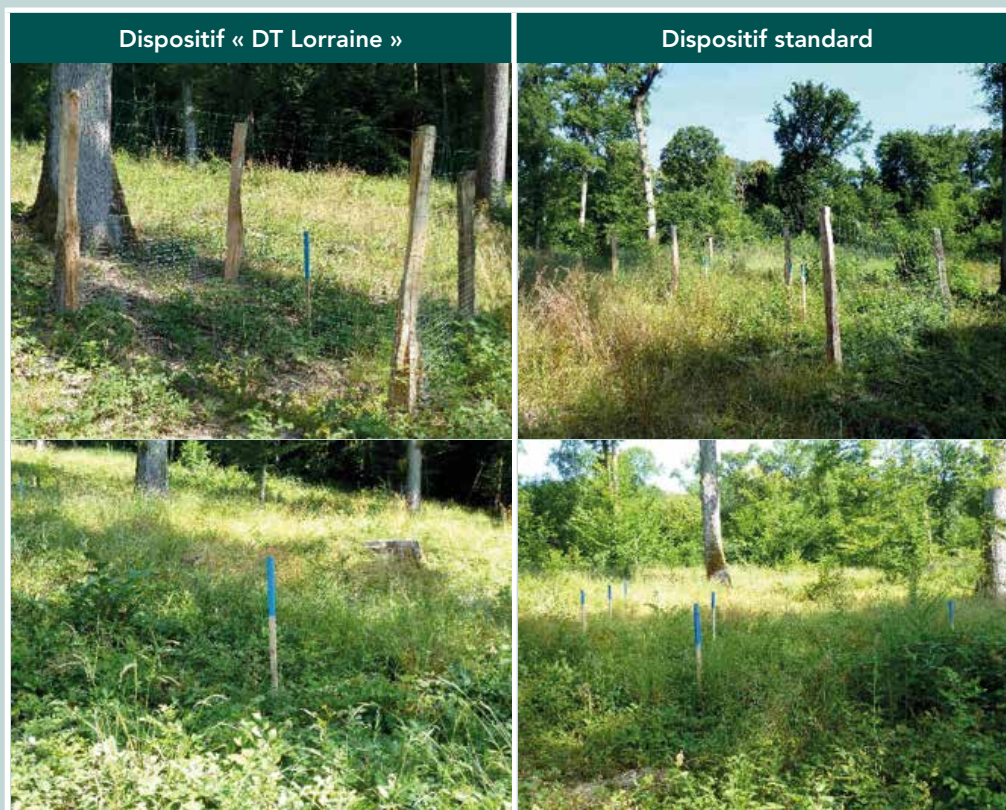
Cas du suivi de la capacité de croissance (à la suite d'un suivi d'installation, ou lorsque les semis sont acquis)

De même 3 enclos et 6 exclos sont positionnés au sein d'une unité de gestion en régénération sur des semis de l'essence objectif de moins de 30 cm de hauteur, en croissance et vigoureux. Chaque placette doit contenir au minimum 3 semis de l'essence objectif. Les zones doivent également être semblables c'est-à-dire présentant un état d'avancement de végétation homogène et évitant les zones de végétation concurrentielle abondante.

Chaque relevé (années n et n+3) portera sur la présence de semis d'au moins 1 an (par essence afin d'estimer la diversité) et la mesure de hauteur des 3 semis les plus grands de chaque placette pour l'essence objectif.

Des densités cible ont été définies pour les essences les plus fréquentes en Lorraine afin de guider les gestionnaires dans l'appréciation des résultats et jauger de la réussite ou non de la régénération.

Pour cette phase de test, des dispositifs standards (2 x 40 m²) seront tout de même implantés simultanément afin de comparer les résultats des deux modalités et de pouvoir évaluer la performance de l'une par rapport à l'autre. Les premiers résultats de ces tests sont attendus à échéance de 3 ans.



Les indicateurs dérivés de ces données

Ce protocole étant déployé depuis peu, nous n'avons pas encore de données réelles permettant d'illustrer le rendu de ces mesures. Pour percevoir le raisonnement associé, prenons un exemple fictif (figure 6), basé sur la hauteur atteinte par la régénération (mais on pourrait faire le même exercice sur la densité des semis). Le dispositif est installé en 2012, la hauteur de la régénération étant de 15 cm en enclos comme en exclos :

- ❶ En enclos, la hauteur 80 cm est atteinte en 2015 (conditions de croissance sans pression des ongulés), à l'extérieur, cette limite est atteinte en 2016. Le retard de croissance induit par les ongulés est donc de 1 an, la vitesse de croissance est donc diminuée d'un tiers.
- ❷ Alors que la hauteur 2 m est atteinte en 2019 par la régénération en enclos, il faut attendre 2025 pour que la régénération soumise à la dent du gibier atteigne cette même hauteur. Soit 6 ans de retard, correspondant à un doublement du temps de croissance.

Perspectives de développement

L'instruction ONF du 5 avril 2016 relative à la gestion de l'équilibre forêt-gibier (ONF, 2016) préconise expressément : « Dans tous les cas, pour que [les données de suivi] soient pleinement exploitables, il faut s'astreindre à les recueillir en mettant en œuvre les protocoles [ICE comme enclos-exclos] tels qu'ils ont été validés, organiser la remontée et le traitement de ces informations ».

Le protocole enclos-exclos a été conçu et testé depuis 2012 sur quelques forêts de la Sarthe (Bercé, Perseigne et Petite Charnie notamment) puis déployé officiellement en janvier 2015 par note de service et guide technique associé. Nombre de gestionnaires semblent avoir été convaincus par la pertinence de ces

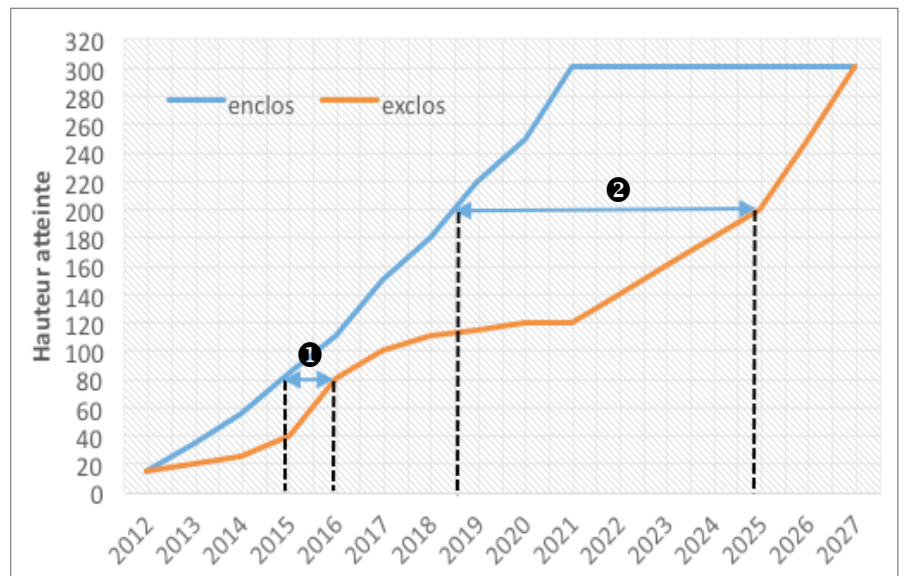


Fig. 6 : exemple fictif de suivi temporel de la croissance en hauteur de la régénération sur un dispositif enclos-exclos

dispositifs et ont donc amorcé leur implantation, notamment à l'occasion de la signature des contrats cynégétiques et sylvicoles. Ce temps très court, imposé par l'intensité des préoccupations des gestionnaires, nous oblige à poursuivre les travaux de développement à mesure que les dispositifs sont déployés. Les premiers résultats étant attendus à échéance de 3 ans, il s'agit désormais de travailler sur un ensemble d'outils permettant d'assurer une valorisation performante des investissements matériels et humains que mobilisent ces dispositifs. L'enjeu le plus immédiat est celui de la prise de données sur le terrain et leur stockage informatique afin de pouvoir les mobiliser ultérieurement et conduire les analyses souhaitées.

Le département RDI travaille actuellement sur un projet en 4 axes : sécurisation des données, analyse harmonisée, animation des dispositifs et évaluation de la performance de l'outil.

La **sécurisation des données** est ici cruciale, dans la mesure où l'ambition est d'analyser des dynamiques. D'une part cela requiert une prise de données selon un protocole et un

format qui ne changent pas d'une année à l'autre et d'autre part cela suppose que les données prises précédemment seront facilement remobilisables. **L'analyse harmonisée** des données récoltées, afin que les différents services s'appuient sur des indicateurs communs pour évaluer l'impact du gibier sur les régénérations, est un gage de qualité et de lisibilité envers les partenaires. Conçue en partenariat avec les gestionnaires, cette analyse harmonisée permettra d'assurer l'utilisation d'indicateurs robustes et partagés pour communiquer et négocier avec les chasseurs. **L'animation des dispositifs** est également un point critique du déploiement de ces outils. Cette phase suppose non seulement de s'assurer que les enclos-exclos seront implantés dans des conditions respectant le cahier des charges initial, mais aussi que les mesures seront effectuées régulièrement. Il s'agit ici de trouver un ou des modèles de management garantissant la bonne mise en place et suivi de ces dispositifs. Enfin, **l'évaluation de la performance** de l'outil enclos-exclos et les stratégies de mise en œuvre devront faire l'objet de travaux dédiés pour en optimiser l'utilisation et la mise en œuvre opérationnelle.

Le déploiement rapide de ces dispositifs enclos-exclos s'inscrit dans une démarche de recherche-action sur un sujet auquel il était nécessaire d'apporter une solution pragmatique à des problèmes urgents. Face à la gravité des situations et dans la perspective de la mise en place des contrats cynégétiques et sylvicoles, il n'était plus envisageable d'attendre les hypothétiques résultats de recherche et validation d'un nouvel indicateur. Si la pertinence des enclos-exclos pour évaluer l'équilibre forêt-gibier s'appuie sur une approche très pragmatique et sur des dizaines d'années d'utilisation scientifique ou démonstrative (Lehaire *et al.*, 2013), il reste néanmoins à affiner quelques aspects de leur mise en œuvre. Il s'agit principalement des modalités d'agrégation des données aux échelles spatiales qui semblent pertinentes aux gestionnaires (lot de chasse, massif) et de la densité de dispositifs à implanter pour disposer d'une réponse stable.

Conclusion

Ces dispositifs enclos/exclos sont, à de nombreux égards, des supports de dialogue entre forestiers et chasseurs (Blanchard, 2008). Les rendez-vous réguliers sur les dispositifs, possiblement lors des mesures, constituent un moment privilégié d'échange entre gestionnaires forestiers et cynégétiques autour de la problématique de l'équilibre forêt-gibier. Plus techniquement, ils permettront de fournir des données objectives sur les paramètres de la régénération, et de quantifier les effets des populations d'ongulés sur cette régénération, pour finalement statuer sur l'atteinte ou non des objectifs de gestion fixés initialement. Ils s'intègrent ainsi pleinement dans le schéma d'une gestion adaptative des populations d'ongulés.

Vincent BOULANGER
Chargé de R&D
Biodiversité-Ecologie
ONF, Département RDI

Bibliographie

Allain R., Commeau A., Picard J.F., 1978. Étude des relations forêt-cervidés en Forêt Domaniale d'Arc-en-Barrois (Haute-marne). *Revue Forestière Française* vol. XXX, pp.333-352. doi:10.4267/2042/21241

Andersen J., 1953. Analysis of a Danish roe-deer population (*Capreolus capreolus* (L.)): based upon the extermination of the total stock. *Vildtbiologisk Station Kalø*.

Archaux F. *et al.*, 2009. RENECOFOR. Dix ans de suivi de la végétation forestière : avancées méthodologiques et évolution temporelle de la flore (1994/95-2005)

Blanchard P., 2008. Les enclos témoins : un projet commun entre chasseurs et forestiers. *Forêt Entreprise* n° 181, pp. 53-55

Boulanger V., 2010. Pression d'herbivorie et dynamique des communautés végétales : Influence à court et moyen termes des populations de cervidés sur la diversité des communautés végétales en forêt. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy soutenue le 27/04/2010. 317p.

Boulanger V., Saïd S., Baltzinger C., Dupouey J.L., 2014. Effets des cervidés sur la biodiversité végétale. Enseignements de deux suivis à moyen terme (10 et 30 ans). *Faune Sauvage* n° 303, pp. 36-41

Cordonnier T., Gosselin F. 2009. La gestion forestière adaptative : intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion. *Revue Forestière Française* vol. 61 pp. 131-143

Jarret P., 2004. Guide des sylvicultures, Chênaie Atlantique. Office National des Forêts, ed. Lavoisier. 335p.

Klein F., Michallet J., Pellerin M., Chevrier T., 2015. Vers une nouvelle gestion du grand gibier : les indica-

teurs de changement écologique. Colloque de Chambord, 20 et 21 mai 2015. *Faune Sauvage* n° pp. 309 25:31

Lehaire F., Morelle K., Licoppe A., Lejeune P., 2013. Les enclos-exclos : une technique éprouvée pour l'évaluation et le monitoring de l'équilibre forêt-grande faune. *Forêt Wallonne* n° 125, pp. 3-14

Mårell A., Ballon P., Hamard J.-P., Boulanger V., 2012. Les dispositifs de type enclos-exclos : des outils au service de la gestion et de la recherche. *Revue Forestière Française* vol. 64 pp. 139-150

Mårell, A., Baltzinger, C., Hamard, J.-P., Saïd, S., 2015. Que peut nous dire la flore sur les effets des ongulés sauvages ?, Colloque ICE, 21 mai 2015, Chambord

Picard J.-F., Ballon P., Hubert L., 1988. L'impact du gibier sur la végétation : évaluation à l'aide d'enclos témoins. *Arborescences* n° 15, pp. 8-12

ONF, 2015. Note de service NDS-15-G-1920 du 7 janvier 2015 : Implantation et suivi de couples d'enclos-exclos pour caractériser l'impact du grand gibier sur la régénération des peuplements. 3p. + guide technique 9200-15-GUI-SAM-048 (Protocole d'installation et de suivi des couples enclos-exclos. 8p.)

ONF, 2016. Instruction INS -16-T-86 du 5 avril 2016 : Assurer l'équilibre forêt-gibier et gérer la chasse en forêt domaniale. 8 p. + annexe

Waller D.M., Johnson S., Collins R., Williams E., 2009. Threats posed by ungulate herbivory to forest structure and plant diversity in the upper Great Lakes region with a review of methods to assess those threats. (No. Natural Resource Report NPS/GLKN/NRR-2009/102.). National Park Service, Fort Collins, Colorado.

Fiche technique - Eau

Contribuer à la protection des captages

Contexte général

L'alimentation en eau potable

L'eau est une ressource stratégique et vulnérable : il est nécessaire de la protéger contre les risques de pollution, en particulier quand elle est destinée à la consommation humaine.

Il existe deux types de captages :

- les captages destinés à l'alimentation collective, publique ou privée, qui sont **réglementés** ;
- les captages pour les besoins individuels.

Le rôle protecteur de la forêt

Les captages situés en forêt fournissent une eau généralement de très bonne qualité. En effet, la présence de la forêt constitue une protection pérenne pour la ressource en eau.

Le couvert forestier assure la préservation du sol, de sa structure et de sa capacité de filtration ; il réduit les



Périmètre de protection de captage immédiat (PPI) en forêt communale de Comps-sur-Artuby (Var)

Credit: J.-M. Mouney / ONF

phénomènes d'érosion. L'activité biologique constante qui s'y produit favorise le recyclage des éléments minéraux et limite le transfert de polluants le cas échéant.

Par ailleurs, les apports d'intrants sont très faibles en forêt, ce qui réduit les risques de dégradation de la qualité de l'eau.

Contexte pour l'ONF

La conformité réglementaire

L'ONF doit connaître les différents types de captages et respecter les **exigences*** se rapportant aux captages réglementés.

La politique environnementale

Les activités forestières peuvent affecter la qualité de l'eau, par

exemple lors de la circulation d'engins générant l'entraînement de particules fines.

S'agissant d'un enjeu majeur, l'ONF, certifié ISO 14001, en a fait une priorité dans sa politique environnementale, dont l'un des objectifs vise à « maîtriser les impacts en périmètres de captage ».

À ce titre, conformément au **RNTSF*** et au **RNEF***, des **prescriptions spécifiques*** doivent être respectées par tout intervenant à proximité d'un captage, réglementé ou non.

La présente fiche technique détaille successivement les exigences réglementaires et le mode opératoire à respecter pour prendre en compte les captages en forêt publique. Les termes suivis de * sont définis dans le glossaire en page 4.*

Méthodes et savoir-faire



Les exigences* à respecter pour les captages réglementés

La réglementation concernant la protection des captages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) des collectivités vise à protéger la ressource vis-à-vis des pollutions microbiologiques (bactéries, virus...) et chimiques. Elle figure aux articles L1321-1 et suivants, R1321-1 et suivants du code de la santé publique, ainsi qu'aux articles L211-3 et L251-13 du code de l'environnement.

Les périmètres de protection (PPI, PPR, PPE)

Tout captage destiné à l'alimentation publique en eau potable doit faire l'objet d'une Déclaration d'Utilité Publique (DUP) faisant l'objet d'un arrêté préfectoral.

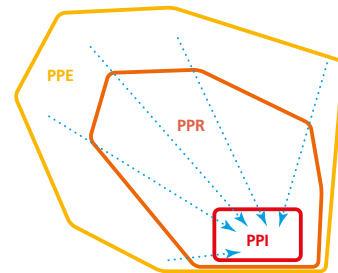
La procédure, portée par la collectivité maître d'ouvrage, est la suivante :

- Une **étude hydrogéologique**,

réalisée par un expert indépendant, permet d'identifier la vulnérabilité de la ressource et les moyens de protection à mettre en place. Sur la base de cette étude, un hydrogéologue agréé identifie des périmètres selon trois niveaux de protection.

- Une **enquête publique** est réalisée.
- Enfin, l'**arrêté préfectoral** fixe les différents **périmètres** de protection et les **servitudes*** s'y rapportant. Celles qui affectent

l'usage du sol peuvent donner lieu à indemnisation.



PPI
Périmètre de protection immédiat
<ul style="list-style-type: none"> • Il correspond au site de captage et est clôturé (sauf dérogation) pour éviter toute intrusion, la détérioration des installations et le déversement de substances polluantes à proximité du lieu de prélèvement. • Le terrain est acquis en pleine propriété par la collectivité maître d'ouvrage. Par dérogation, s'il appartient à l'État ou à une collectivité locale, ce terrain peut faire l'objet d'une convention de gestion. Il est demandé d'orienter la collectivité maître d'ouvrage vers ce conventionnement afin d'éviter les enclaves difficiles à gérer.
Toute activité y est interdite a priori , hormis les opérations d'entretien des ouvrages ou du périmètre.

PPR
Périmètre de protection rapproché
<ul style="list-style-type: none"> • De surface généralement plus vaste, il constitue une zone tampon entre le lieu des activités à risques pour la qualité de l'eau captée et le captage. L'objectif est de disposer d'un délai de réaction si une pollution survient. • Son périmètre est fixé en fonction du délai de transit des éléments polluants potentiels (par exemple, 50 jours pour un captage en milieu poreux ou 2 heures pour un captage d'eau de surface), permettant aux autorités de prendre les mesures nécessaires en cas de pollution.
Toute activité pouvant provoquer une pollution ou une modification des écoulements peut être réglementée voire interdite.

PPE
Périmètre de protection éloigné
<ul style="list-style-type: none"> • Il est institué uniquement lorsqu'il existe un risque accru de pollution de la nappe.
S'il est identifié, certaines activités y sont réglementées lorsqu'elles présentent un danger de pollution pour les eaux.

La DUP* peut ne pas imposer de PPR* ou de PPE*.

En cas de pollution, les services chargés de la police de l'eau analysent l'enchaînement des actions ayant abouti à l'incident et déterminent qui est responsable civilement. Le défaut d'information peut engager la responsabilité du donneur d'ordre des travaux ou celle de l'intervenant.

Par ailleurs, la dégradation des ouvrages de captage, le fait de laisser introduire des matières susceptibles de nuire à la salubrité ou encore le non-respect des réglementations et servitudes attachées aux périmètres de protection de captages peut conduire à des sanctions pénales.

Les aires d'alimentation des captages d'eau (AAC)

Le dispositif ci-dessus cité permet de lutter contre les pollutions ponctuelles.

Pour les pollutions diffuses, une réflexion est engagée sur l'AAC* (territoire sur lequel l'eau qui s'infiltre ou ruisselle alimente le captage).

Certains captages peuvent alors faire l'objet d'un plan d'actions de restauration, qui peut être rendu obligatoire par le Préfet si nécessaire.

Méthodes et savoir-faire

Comment prendre en compte les captages en forêt publique

> Suivre les procédures de protection en cours pour les captages réglementés

Les contraintes d'exploitation peuvent entraîner un gel de la desserte, un débardage alternatif, des interdictions de dépôts de bois... Aussi l'ONF a tout intérêt à **être présent lors de la réalisation de l'expertise** et à bien expliquer les modalités réelles de ses pratiques d'exploitation.

Le fait d'entretenir des contacts réguliers avec le gestionnaire, l'Agence régionale de la Santé (ARS) et les hydrogéologues agréés peut favoriser la compréhension des besoins mutuels. **Prendre part à l'élaboration de la DUP*** est primordial.

En cas de préjudice, la procédure permet une **indemnisation** (perte de valeur d'avenir, contrainte sur la desserte...).

En complément, une **contractualisation** peut être négociée pour prendre en charge les surcoûts occasionnés par des contraintes sur la gestion.

> Obtenir les données relatives aux captages et les porter à connaissance en interne

Les données sont centralisées et actualisées par les ARS*, avec lesquelles des conventions doivent être nouées pour leur obtention, notamment la géolocalisation.

Ces données, progressivement intégrées aux applications informatiques, ont un **caractère confidentiel** et ne doivent en aucun cas être diffusées en externe par l'ONF.

Les **arrêtés préfectoraux de DUP*** doivent être portés à la connaissance des personnels concernés.

> Les intégrer aux aménagements (documents publics pour partie)

Au § 1.3.3 partie B, réaliser en fonction des enjeux :

- un tableau des captages réglementés et des périmètres ;
- un tableau des autres captages ;
- une synthèse des risques liés à la gestion forestière sur la ressource en eau potable.

Au § 2.5.4 partie B :

- éviter une régénération brutale à proximité du captage ;
- sur les stations acides, éviter les espèces très acidifiantes ;
- si possible, à proximité immédiate du captage, assurer contractuellement avec le bénéficiaire la pérennité du

peuplement forestier (mélange des essences, irrégularisation).

En cas d'enjeu moyen ou fort, annexer à l'aménagement la **cartographie** des captages et de leurs périmètres (**données non diffusables** en externe).

> Les prendre en compte dans les interventions forestières

Programmation

Tout **donneur d'ordre** doit :

- > prendre toutes précautions utiles pour éviter les pollutions ;
- > orienter pistes et cloisonnements pour éviter le ruissellement (source de pollution) vers le PPI* ou le captage et ne pas en prévoir à moins de 25 m ;
- > pour les captages réglementés, vérifier la conformité des opérations avec les servitudes de la DUP* ;
- > si nécessaire, réaliser une **DT*** en se référant à la NDS-12-G-1798 ;
- > lors de l'établissement du cahier des charges de travaux ou des clauses particulières d'une vente :
 - mentionner les **captages, périmètres de protection** et **servitudes** de la DUP* ;
 - rappeler les **prescriptions spécifiques*** du **RNTSF*** (§ 2.3) et du **RNEF*** (§ 1.1.3) ;
 - fournir les coordonnées du gestionnaire du captage (à défaut de la commune), pour que l'intervenant puisse donner l'alerte en cas de problème.

Réalisation

Si captage réglementé

Tout **intervenant** dont le chantier se situe **dans un périmètre de protection** doit :

- > si nécessaire, effectuer une **DICT***.

Dans le PPI* :

- > **ne réaliser aucune intervention** (sauf si prévue par le gestionnaire ou la convention de gestion).

Dans le PPR* :

- > respecter les **servitudes** de la DUP* ;
- > respecter les **prescriptions spécifiques*** du **RNTSF*** (§ 2.3) et du **RNEF*** (§ 1.1.3) :
 - ne pas effectuer de traitement phytosanitaire ;
 - ni stocker ni déverser dans le milieu de lubrifiant, carburant et autres substances dangereuses ;
 - ne pas laisser stationner d'engins ;
- > veiller à limiter les ornières et à les niveler lors de la remise en état des lieux.

Dans le PPE* :

- > respecter les **servitudes** de la DUP*.

Si captage non réglementé

Tout **intervenant** dont le chantier se situe **à moins de 50 mètres d'un captage** doit :

- > si nécessaire, effectuer une **DICT***.
- > respecter les **prescriptions spécifiques*** du **RNTSF*** (§ 2.3) et du **RNEF*** (§ 1.1.3).
 - ne pas effectuer de traitement phytosanitaire ;
 - ni stocker ni déverser dans le milieu de lubrifiant, carburant et autres substances dangereuses ;
 - ne pas laisser stationner d'engins.
- > veiller à limiter les ornières et à les niveler lors de la remise en état des lieux.

Plus d'informations

Sources externes

- > **Directive cadre sur l'eau** (2000/60/CE) du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000
- > **Code de la santé publique** : articles L1321-1 et suivants, R1321-1 et suivants
- > **Code de l'environnement** : articles R554-2 et suivants
- > **Protection des captages d'eau – Acteurs et stratégies**
Ministère de la Santé et des Sports - 2008
www.sante.gouv.fr/protection-des-captages-d-eau-guide-technique.html
- > **Protéger et valoriser l'eau forestière**
Forêt Privée Française, Centre National de la Propriété Forestière - 2014
- > **Portail Eaufrance** permettant d'accéder à toutes informations et données publiques relatives à l'eau et aux milieux aquatiques
www.eaufrance.fr
- > **Site des Agences de l'eau** permettant de retrouver les données spécifiques à chaque territoire d'agence de l'eau.
www.lesagencesdeleau.fr
- > **Site de l'ONEMA**
www.onema.fr
- > **Site « DICT en ligne »**
www.dict.fr

Sources internes

- > **RNTSF** (Règlement national des travaux et services forestiers) : 9200-10-RN-SAM-001
- > **RNEF** (Règlement national d'exploitation forestière) : 9200-08-RN-BOI-001
- > **NDS-13-G-1837** : Captages pour l'alimentation en eau potable (AEP) situés en forêt domaniale. Relations avec les collectivités publiques bénéficiaires.
- > **NDS-12-G-1798** : Projet et exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens et subaquatiques de transport ou de distribution. Modalités de mise en œuvre d'une déclaration de projet de travaux (DT) et d'une déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT).
- > **Intraforêt**
 - page **18efc** : Captages d'eau potable - Maîtrise des impacts
 - page **1278a** : Protection de l'eau et des zones humides
 - page **2efdc** : Politique environnementale et norme ISO 14001

Contact

Aspects techniques :
pascale.mercier@onf.fr (DFRN)
emmanuel.moitry@onf.fr (Campus)

Aspects réglementaires :
anouk.ferte-devin@onf.fr (DJ)

Référents Eau des DT/DR :
Intraforêt : page **1f947**

Cette fiche est éditée conformément au suivi du programme environnemental (SPE).

Direction de la publication
ONF – DFRN/DCOM

Rédaction
Jean-Michel MOUREY
Pascale MERCIER
Emmanuel MOITRY
Henri-Pierre SAVIER

Été 2011 - Réédition 2015

Glossaire

AAC : aire d'alimentation des captages d'eau

ARS : Agence régionale de la Santé

DICT : déclaration d'intention de commencer les travaux

DT : déclaration de projet de travaux (en application des articles R554-2 et suivants du code de l'environnement)

DUP : déclaration d'utilité publique

Exigence : réglementation ou engagement pris par l'ONF à respecter par tout donneur d'ordre ONF

PPE : périmètre de protection éloigné

PPI : périmètre de protection immédiat

PPR : périmètre de protection rapproché

Prescription particulière : mesure fixée par l'ONF au cas par cas en fonction du contexte local, à respecter par l'intervenant

Prescription spécifique : mesure systématique fixée par l'ONF en présence de l'enjeu considéré, à respecter par l'intervenant

RNEF : règlement national d'exploitation forestière

RNTSF : règlement national des travaux et services forestiers

Servitude : exigence* réglementaire s'imposant au propriétaire d'un terrain



Délimitation du périmètre de protection de captage des eaux de La terrasse Lubin et Crolles



Périmètre de protection de captage, borne naturelle



Dans le périmètre de protection du captage du Champ des sources

à suivre

Prochain numéro :

À venir, entre autres, un dossier sur l'état des lieux du machinisme forestier en matière de tassement et orniérage.

Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

Sur intraforêt : depuis toutes les pages d'intraforêt, cliquer sur le lien « Portail biblio » du pavé « Ressources » en colonne de gauche (ou noter, dans la barre d'adresse : <http://biblio.onf.fr>) pour arriver sur la page d'accueil du portail ; en choisissant (pavé de gauche) de faire une recherche « dans une collection ONF », puis en choisissant « Rendez-vous techniques » dans la nouvelle fenêtre, on accède à tous les articles et dossiers au format PDF.

Sur internet : [http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/Périodiques))

La revue **RenDez-Vous techniques** est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec France nature environnement : « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur ad hoc, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans RDV techniques et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.

**Si vous désirez nous soumettre des articles
prenez contact avec :**

ONF – Département recherche,
développement et innovation
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 47
Courriel : rdvt@onf.fr

