RenDez-Vous echniques

patrimoine sylviculture progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité qestion durable



_35

p. 3

Forêts de protection et prévention des risques

Dossier Écorisques (science économique, forêt et risques)

p. 29





R e n D e z - V o u s t e c h n i q u e s

Directeur de la publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Myriam Legay, Patrice Mengin-Lecreulx (et autres correspondants)

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF – Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture :

En haut : Alain Blumet, ONF En bas : James Gourier, ONF

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)

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 :** septembre 2016



sommaire

n° 51-52 - printemps-été 2016

3 Pratiques

Prise en compte des forêts à fonction de protection dans les cartographies réglementaires de prévention des risques naturels Tour d'horizon européen et recommandations pour la France

par Jérôme Liévois, Alison Evans, Anthony Dubois

10 Connaissances

Dépérissement massif de peuplement de chêne : to cut or not to cut ? Analyse de suivis sanitaires à Vierzon

par Quentin Girard

19 Méthodes

Le réseau Amendement pour le suivi sur le long terme de la restauration ou du maintien de la fertilité en forêt

par Arnaud Legout, Claude Nys, Serge Didier et Claudine Richter

29 Dossier Connaissances

Ecorisques (science économique, forêt et risques)

Pratiques

Prise en compte des Chiroptères à l'échelle d'un aménagement forestier Exemple de Rambouillet et perspectives méthodologiques

par Marie Parrot et Laurent Tillon

67 Fiche technique

Fiche n° 13 – Paysage – Constater, signaler et traiter les dépôts sauvages du plan d'action environnemental ONF



éditorial

Signe des temps, ou hasard des contributions? Cette édition de nos RenDez-Vous techniques est très largement consacrée à des thèmes impliquant risques et incertitudes, sans qu'on ne l'ait particulièrement prémédité.

Risques et incertitudes de toutes natures dans le dossier « Ecorisques » qui aborde, avec les méthodes de l'analyse économique, cette question déstabilisante : comment gérer les forêts en contexte de risques et incertitudes multiples ? Vu l'immensité du sujet, il ne faut pas s'attendre ici à trouver toutes les réponses attendues, en dépit de quelques conclusions intéressantes ; l'intérêt est surtout de montrer comment la science économique et, au-delà, les sciences humaines et sociales, peuvent aider à étayer les raisonnements, à faire des choix.

Risques « historiques » aussi, avec la question des forêts de protection contre les aléas de montagne. Si ancienne et connue qu'elle soit, cette problématique est plus que jamais d'actualité. Il s'agit ici de savoir comment prendre en compte cette fonction protectrice de certaines forêts dans les zonages réglementaires de prévention, les plans de prévention des risques. En filigrane, cela pose une autre question majeure : celle de la sylviculture particulière - et du renouvellement - de ces forêts à objectif de protection. Ce sera le thème d'un séminaire qui réunira à l'automne les principaux acteurs concernés à l'ONF et leurs interlocuteurs du ministère de l'Agriculture et des services déconcentrés, et dont RenDez-Vous techniques se fera l'écho dans un prochain numéro.

Risques et incertitudes d'ordre pédo-climatique ou stationnel, enfin, avec un retour sur le dépérissement qui a sévi en forêt de Vierzon et l'analyse des effets (aggravants ou non ?) de la récolte des chênes dépérissants. La crise est passée, la situation s'est améliorée, mais les indications données ici seront à n'en pas douter d'une grande utilité pour d'autres crises à venir, à Vierzon ou ailleurs. Dans le même ordre d'idée, mais sur un registre très différent, l'INRA s'outille, en constituant un réseau expérimental dédié au suivi et à la restauration de la fertilité en forêt, pour affronter des questions émergentes, prévenir les menaces que les changements globaux font peser sur les sols forestiers.

Ce numéro se termine néanmoins sur une note plus apaisante : la proposition d'une méthode de prise en compte de la biodiversité saproxylique, incarnée par les chiroptères, dans les décisions d'aménagement forestier.

Le Directeur Forêts et Risques Naturels Albert MAILLET

Prise en compte des forêts à fonction de protection dans les cartographies réglementaires de prévention des risques naturels

Tour d'horizon européen et recommandations pour la France

On sait de longue date que la forêt peut avoir un effet protecteur face aux aléas naturels en montagne. On sait de mieux en mieux évaluer cette fonction, mais comment la traduire dans les modalités réglementaires de prévention? En octobre 2014, le célèbre site de Sixt-Fer-à-Cheval a accueilli un groupe de travail européen, piloté par l'ONF-RTM et le service homologue autrichien, qui a émis des recommandations à l'intention des États concernés.

i le boisement/reboisement des bassins versants de montagne a été l'une des idées fortes de la politique dite de restauration des terrains en montagne (RTM) en France, l'appréciation de la capacité de la forêt à participer à la maîtrise des aléas naturels est longtemps restée intuitive faute d'éléments méthodologiques. Ces dernières années, divers projets de recherche et de coopération transfrontalière ont contribué à améliorer la compréhension de cette fonction et à doter les gestionnaires forestiers d'outils pour concevoir et réaliser les opérations sylvicoles appropriées. Se pose maintenant la question de la prise en compte de cet effet atténuateur de la forêt dans le dispositif réglementaire de cartographie des aléas et de prévention des risques; en France, mais aussi dans d'autres pays confrontés à la même problématique.

C'est pourquoi un groupe de travail de la Commission Européenne des Forêts (CEF), piloté par le département Risques naturels de l'ONF (domaine RTM) et le service homologue du ministère autrichien de l'Environnement, s'est réuni en octobre 2014 à Sixt-Fer-à-Cheval (74). Les participants venaient d'Autriche, Italie, Suisse, Turquie et de France (Service RTM 74 et ONF International). Il s'agissait d'échanger sur les pratiques en termes de prise en compte des forêts à fonction de protection (FFP)¹ dans les documents réglementaires de prévention des risques naturels en zone de montagne, le souhait étant d'aboutir à la formulation de recommandations destinées aux États ou Provinces en charge de ces politiques (voir encadré 1).

1 – Cadre institutionnel et recommandations de l'atelier de Sixt-Fer-à-Cheval

La Commission Européenne des Forêts est un organe de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et plus particulièrement de son Département des forêts. Son travail s'appuie sur plusieurs structures, dont le groupe de travail sur l'aménagement des bassins versants de montagne (Working Party on the Management of Mountain Watersheds – WP MMW)* qui a lui-même constitué, en 2013, un sous-groupe de travail « Risques naturels ». Ce dernier se réunit chaque année en atelier thématique pour partager des expériences pratiques et émettre des recommandations pour améliorer les politiques de prévention.

L'atelier d'octobre 2014 à Sixt-Fer-à-Cheval (74) a donné lieu à un document de synthèse intitulé « Hazard zone mapping and the integration of the forest protection function » qui suggère six types d'actions aux États et Provinces :

- 1. Adapter les procédures nationales de cartographie des aléas/risques naturels en montagne pour l'intégration de la fonction de protection des forêts.
- 2. Identifier systématiquement les forêts à fonction de protection et quantifier cette fonction.
- 3. Décrire les conditions techniques nécessaires à cette quantification sans lesquelles la prise en compte doit être négligée.
- 4. Orienter les politiques nationales pour assurer la durabilité (technique et financière) des peuplements qui remplissent cette fonction.
- 5. Approfondir les connaissances sur l'effet des forêts vis-àvis des glissements de terrain superficiels.
- Étudier l'impact environnemental et socio-économique de la gestion sylvicole des forêts ayant une fonction de protection.
- * http://www.fao.org/forestry/37705/en/

¹ Cet article traite des forêts à fonction de protection contre les risques naturels telles que définies dans la NDS 13-G-1833 de l'ONF, § 2 de la page 2 ainsi que dans la note 9200-13-GUI-EAM-021, § 4 de la page 5

La déclinaison de ces recommandations pour la France a été rédigée en 2015 par les représentants de l'ONF RTM à l'intention du ministère en charge de la prévention des risques naturels (et du ministère chargé des forêts). Nous en donnons ici les grandes lignes, après une rapide présentation des sites visités comme « support » de la réflexion et un tour d'horizon des usages par pays.

Une comparaison des pratiques à partir de cas concrets

La fonction de protection de la forêt a été abordée par les participants à partir de six sites illustrant diverses questions que peut soulever sa prise en compte (ou pas) dans la cartographie des aléas à la base des documents réglementaires de prévention; sites répartis entre la haute vallée du Giffre (Sixt-Fer-à-Cheval, Samoëns et Taninges) et la haute vallée de la Dranse (Morzine).

- Au Frénalay (Sixt), une tradition populaire attribue à la forêt une fonction de protection contre le risque de chute de blocs (figure 1). Le PER de la commune (voir encadré 2), approuvé en 1987, n'en fait pas mention.
- Au Mollier (Sixt), une parcelle de forêt communale, dont la fonction de protection contre les chutes de pierres est avérée et bien décrite dans l'aménagement forestier, a servi de site expérimental élaboré par Irstea pour former les forestiers à une sylviculture de protection, en dépit de l'absence d'identification d'un aléa chutes de blocs dans le PER (figure 2).
- À Vallon (Samoëns), un versant composé de rochers, d'alpages et de forêts permet d'appréhender la fonction de protection vis-à-vis d'avalanches et ses limites. Seules sont cartographiées dans le PPR (encadré 2) les avalanches partant au-dessus de la limite forestière,



Fig. 1 : le Pic de la Corne à Sixt-Fer-à-Cheval avec, au pied, la forêt « de défend » du Frénalay

2 – Le plan de prévention des risques (PPR)

Institué par la Loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, le PPR est au centre de la politique nationale française de prévention contre les risques naturels prévisibles. Le PPR doit comporter : un rapport de présentation, un zonage réglementaire issu du croisement de la carte des aléas avec les enjeux et un règlement qui décrit pour chaque zone de risque, les contraintes constructives et/ou d'urbanisme à respecter, ainsi que des règles d'utilisation et de gestion des sols. Le PPR vaut servitude d'utilité publique qui s'impose à tous, il doit notamment être repris dans le plan local d'urbanisme (PLU) lorsqu'il existe.

La loi instituant le PPR a abrogé l'ancienne procédure du PER (Plan d'exposition aux risques) en précisant que les PER déjà approuvés valent PPR.

Rappel:

- Risque : produit d'un aléa et d'un enjeu.
- Aléa : manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données.
- Enjeu : ensemble des personnes et des biens susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. L'enjeu se caractérise par son importance (nombre, nature, etc.) et sa vulnérabilité.

et que la forêt ne peut arrêter. Le potentiel de nouveau point de déclenchement et couloir d'avalanche dans l'hypothèse de la disparition du couvert forestier n'a pas été étudié.

- À la Tassonière (Morzine), le peuplement forestier, judicieusement conduit, accompagne un dispositif de protection contre les chutes de pierres. Le zonage réglemen-
- taire du PPR ne tient pas compte des ouvrages (conformément aux directives) ni de la présence du couvert forestier, assimilé en l'occurrence à un ouvrage.
- Dans la Vallée des Ardoisières (Morzine), la forêt qui s'étend au pied d'une falaise sujette aux écroulements en masse ne peut pas avoir de fonction de protection contre un tel phénomène.

- Dans la vallée de La Manche (Morzine) la forêt stoppe couramment des pierres d'un volume inférieur au mètre cube mais n'a pas pu arrêter en 2013 un bloc exceptionnel de 23 m³. La forêt a bien une fonction de protection, dûment cartographiée dans le PPR avec cette limite de fonctionnalité.
- Dans le Bois des Gets (Taninges), une coupe mal organisée dans une forêt privée à fonction de protection évidente a aggravé le risque de chutes de pierres pour les usagers d'une route départementale. Le PPR de cette commune (1999) n'aborde pas la gestion sylvicole de protection.

Ces visites ont permis à chacun d'exprimer l'approche que ferait sa propre structure nationale ou provinciale face à ces situations.

En France – Le ministère en charge de l'environnement a édité des guides pour la cartographie des aléas et pour la cartographie réglementaire de prévention des risques, qu'il finance intégralement. Ce sont les préfets des départements qui les mettent en œuvre. D'après ces quides, les ouvrages de protection doivent être transparents pour la cartographie de l'aléa (qui ne doit pas tenir compte de leurs effets) mais pratiquement rien n'est écrit sur la fonction de protection des forêts. Toutefois le code forestier reconnaît la possibilité de réglementer l'espace forestier dans les PPR et, par ailleurs, l'ONF produit couramment dans l'aménagement des forêts publiques une carte des diverses fonctions, qui identifie notamment la fonction de protection et l'assortit de critères dendrométriques précis. Depuis 2004, plusieurs PPR ont décrit des forêts à fonction de protection et ont pondéré l'aléa du fait de cette identification. Ces documents ont été approuvés par les préfets (figure 3).



Fig. 2 : au Mollier, une forêt de protection ayant servi de site d'études et de formation à une sylviculture de protection avec Irstea

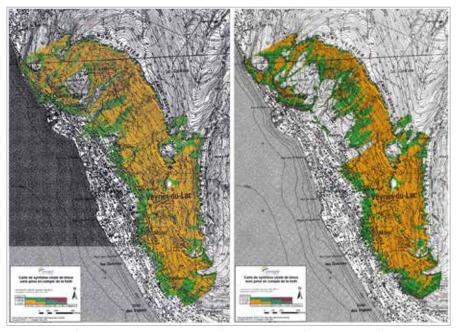


Fig. 3 : les progrès en matière de trajectographie ainsi que l'arrivée des images Lidar permettent de modéliser et cartographier l'aléa rocheux « avec » ou « sans » forêts (Irstea, 2009); ici, un exemple ayant présidé au zonage du PPR sur la commune de Veyrier du Lac (74) À gauche, carte de l'aléa sans prise en compte de la forêt à fonction de protection À droite, carte de l'aléa prenant en compte les FFP

Jaune = aléa fort; vert = aléa moyen (au regard de l'énergie des blocs)

En Suisse – La confédération finance l'élaboration de cartes de danger (aléas) à hauteur de 50 % et a édité un guide sur ce sujet. Ce sont les cantons qui financent le reste et mettent en œuvre l'étude et l'édition de ces cartes suivant une directive fédérale (figure 4).

Les effets de la protection par les ouvrages doivent être systématiquement intégrés dans la qualification de l'aléa. En revanche, la fonction de protection des forêts est prise en compte à des degrés divers suivant la nature de l'aléa, le site... et la pratique de l'expert privé mandaté par le canton. Par ailleurs les services forestiers fédéraux ont réalisé une cartographie (informative) des différentes fonctions des forêts helvétiques.

En Autriche – L'échelon fédéral valide la cartographie d'aléas réalisée à l'échelon provincial via des praticiens publics qui suivent un décret fédéral. La forêt comme les ouvrages sont systématiquement pris en compte pour la qualification de l'aléa torrentiel ainsi que pour le droit à construire en aval des dispositifs de correction; les surfaces supportant un dispositif fédéral de protection sont cartographiées en violet, celles où la préservation de la forêt est nécessaire le sont en bleu. Pour les autres aléas (avalanches, chutes de pierres, etc.) cet affichage des ouvrages et des forêts de protection est courant, voire systématique, mais non réglementaire (figure 5).

En Italie, Province de Bolzano – La province décrit la méthode de cartographie de l'aléa, très proche du modèle suisse et finance les cartes d'aléas à 80 %. Celles-ci sont ensuite déclinées par les communes. Dans le cadre de la démarche de prévention, les forêts à fonction de protection sont cartographiées à part, indépendamment des cartes des aléas (figure 6).

Cependant les cartes des aléas sont révisables soit en cas d'implantation d'un dispositif de protection soit en cas de disparition accidentelle d'ouvrage ou d'un peuplement forestier. Cela montre que la fonction de protection est bien intégrée dans la qualification des aléas en fonction du boisement des versants.

En Turquie – Seul l'aléa inondation fait à ce jour l'objet d'une cartographie réglementaire par le service hydraulique national. Une réflexion est en cours pour l'établissement par le service forestier d'une carte des aléas « avalanches ». Il est prévu que les dispositifs paravalanches y figurent et que leurs effets soient pris en compte dans la qualification de l'aléa.

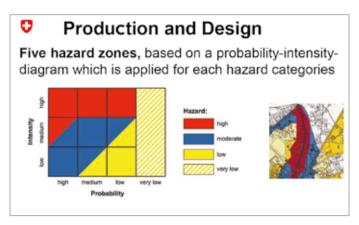


Fig. 4 : un protocole fédéral pour la qualification des aléas (Suisse)

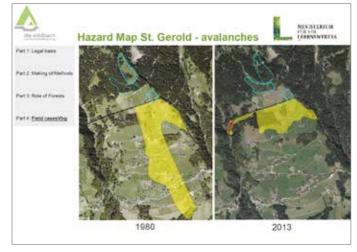


Fig. 5 : un exemple d'évolution du zonage de l'aléa « avalanche » tenant compte de l'évolution du couvert forestier (Autriche)

En bleu, les périmètres forestiers à prendre en compte. En 2013, l'évolution des peuplements réduit (et modifie) l'emprise de l'aléa avalanches par rapport à 1980

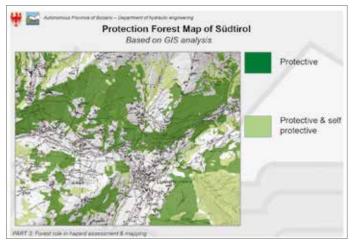


Fig. 6 : Une cartographie détaillée des forêts à fonction de protection (Province de Bolzano, Italie)

La déclinaison des propositions au contexte national français

1. Adapter les procédures nationales de cartographie des aléas

Les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) sont au cœur de la politique de prévention en France. Le constat est fait que les divers guides thématiques édités par la puissance publique pour l'élaboration des PPR n'abordent pas l'effet de la forêt sur la maîtrise (ou l'aggravation) du risque. Cependant le nouveau code forestier (art.L144-1) donne la possibilité, pour les PPR, de « prévoir des règles de gestion et d'exploitation forestière dans les zones de risques qu'ils déterminent », et plusieurs PPR approuvés par les préfets identifient les forêts à fonction de protection dans la carte réglementaire, règlement spécifique à l'appui.

Par ailleurs les guides de sylviculture et le manuel d'aménagement forestier de l'ONF donnent les indications opérationnelles pour évaluer et améliorer la fonction de protection des forêts. De manière synthétique il s'agit d'assurer une diversité des essences feuillues et des classes d'âge en zone de chute de pierres; d'assurer une diversité des classes d'âges dans des peuplements en bouquet et à couvert permanent (résineux) dans les zone de déclenchement potentiels

d'avalanches; d'assurer simplement un état boisé dans les bassins versant torrentiels et enfin de conduire les ripisylves en taillis.

Première proposition : À partir d'exemples de PPR approuvés, les guides PPR avalanches, torrents et mouvements de terrain pourraient être utilement amendés afin d'intégrer la fonction de protection des forêts comme élément constitutif du milieu naturel sans nécessité de reprendre les textes légaux et réglementaires en viqueur.

2. Identification systématique des forêts à fonction de protection (FFP)

La méthode de cartographie des FFP a été mise au point et testée avec succès d'abord lors d'un projet Interreg Forêt de Protection (2009-2011) intéressant les Alpes du nord, puis dans un projet de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC). Les protocoles en quatre temps passant par l'identification des zones d'aléas, la localisation des périmètres forestiers, la caractérisation des enjeux et la dendrométrie ont été mis au point (figure 7). Ils sont accessibles à tout acteur de la gestion forestière.

Deuxième proposition : À partir d'un protocole déjà bien rodé sur le territoire national, toute étude ou révision d'un PPR, voire d'un PLU intéressant une commune de montagne doit être l'occasion d'une cartographie systématique des forêts à fonction de protection.

3. Décrire les conditions techniques nécessaires à la quantification de cette fonction

Dès les premières recherches appliquées menées par Irstea au milieu des années 1990, il est apparu que le simple « dire d'expert » sur la fonction de la forêt était insuffisant et même souvent contre productif, lorsqu'une expertise de détail venait contredire la première affirmation. Pour cette raison il convient d'exiger l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT), d'orthophotographies aériennes, de logiciels simples de modélisation (ligne d'énergie...) et la pratique de mesures dendrométriques (à l'avancement plutôt que par échantillonnage systématique). Sans ces moyens il est préférable de surseoir au zonage des FFP dans les PPR.

Troisième proposition: Les conditions techniques d'une prise en compte des FFP dans la prévention des risques naturels sont: la maîtrise d'un SIG, la possession d'un MNT et d'orthophotographies, et enfin la capacité à pratiquer une expertise forestière.

4. Orienter les politiques nationales pour assurer la durabilité des FFP

Les peuplements forestiers sont des milieux vivants à cycle long. La conduite sylvicole passe par des interventions brèves mais dont les effets méritent d'être suivis sur le long terme. Or si les « expériences » sont nombreuses dans le domaine sylvicole, les retours d'expériences formalisés sont beaucoup plus rares. Il en va de même pour les financements de ces sylvicultures dont les sources et les conditions d'octroi évoluent très couramment. Il conviendrait d'identifier clairement le ou les organismes qui auraient une mission d'observatoire et d'information.

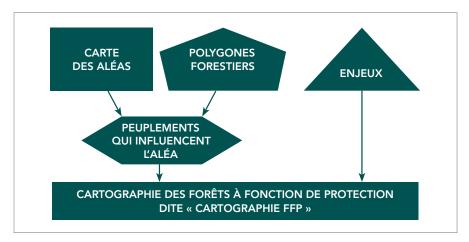


Fig. 7 : la méthode générale pour caractériser les zones de forêts à fonction de protection (FFP) élaborée et mise en œuvre dans le projet INTERREG IV « Forêts de protection »

Quatrième proposition: Identification des organismes aux compétences techniques reconnues chargés de mettre sur pied un observatoire des sylvicultures pour des forêts à fonction de protection et de diffuser en temps réel une information sur les divers modes de financement existants, en fonction du régime du foncier.

5. Approfondir les connaissances sur l'effet des forêts visà-vis des glissements de terrain superficiels

L'interaction entre forêt et glissement de terrain est rarement abordée parce que mal connue et probablement ténue. Pour les participants à l'atelier de Sixt-Fer-à-Cheval, c'est un domaine qui nécessite un plus grand investissement de la part du monde de la recherche.

Cinquième proposition : Susciter une campagne de recherche sur l'interaction forêt/glissement de terrain.

6. Étudier l'impact environnemental et socioéconomique de la gestion sylvicole des FFP

En général, la conduite d'une sylviculture de protection représente au mieux un manque à gagner sur les revenus forestiers et au pire un investissement sans retour financier quantifiable. De plus cette sylviculture demande du temps long que l'implantation d'ouvrage de génie civil n'impose pas. Enfin les stratégies de protection retenues auront un impact en termes d'activité économique et plus encore de paysage. Face à cette complexité, les élus comme les services déconcentrés de l'État sont demandeurs d'un référentiel (base de données) sur les coûts et les effets de divers choix possibles à partir d'opérations déjà réalisées.

Sixième proposition: Concertation entre ministère en charge des forêts et ministère en charge de la prévention des risques sur la politique à tenir vis-à-vis des forêts à fonction de protection. Développement d'outils d'évaluation de l'efficience des dispositifs de protection. Élaboration et suivi d'un référentiel des travaux sylvicoles pour les FFP en terme financier, d'emploi et d'impacts environnementaux.

Quelles suites?

Il appartient au ministère de l'Environnement d'étudier ces propositions avec notamment l'ajout d'un paragraphe sur les forêts à fonction de protection et les règlements sylvicoles associés dans les guides thématiques pour l'élaboration des PPR.

Par ailleurs le constat est fait que certains services préfectoraux et des collectivités entendent poursuivre l'intégration de la forêt dans le dispositif de prévention des risques naturels et du développement durable des territoires, à l'exemple de ce qui est déjà pratiqué sur plusieurs communes de montagne (figure 8).

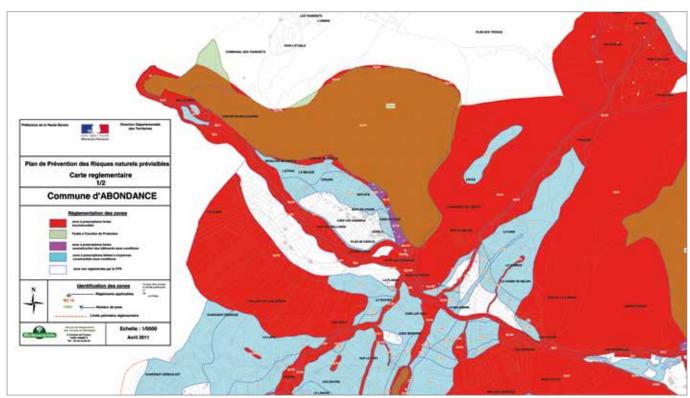


Fig. 8 : Extrait de la carte réglementaire du PPR de la commune d'Abondance approuvé en 2008 avec zonage des FFP (assorti d'un règlement des coupes) en hachures vertes Rouge = zone inconstructible; bleu = construction possible sous certaines conditions; blanc = non réglementé par le PPR

Ces acteurs attendent par ailleurs une stabilisation et une pérennisation des aides financières pour une sylviculture de protection qui ne peut s'inscrire que dans un terme long.

Jérôme LIÉVOIS Alison EVANS

ONF RTM, service RTM Haute-Savoie

Anthony DUBOIS ONF International

Références

FAO, 2014. Hazard zone mapping and the integration of the forest protection function. Report of the workshop1. Working Group II of the EFC WPMMW. 100 p. Lien de téléchargement: http://www.fao.org/forestry/89331/en/

Gauquelin X., Courbaud, B., 2006. Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Nord françaises. CEMAGREF – CRPF Rhône Alpes – ONF – ISBN 2-84207-306-1. 289 p. Liévois J., Clouet N., Berger F., 2012. Cartographie des forêts à fonction de protection – Notice explicative. Interreg Forêts de Protection. ONF – Irstea. 16 p.

ONF, 2012. Détermination de la maîtrise des aléas par les peuplements en forêt à fonction de protection. Fiche du Manuel d'Aménagement 9200-12– GUI-EAM-018-VERSION A

Renaud J.P. et al, 1994. Les forêts résineuses à fonction de protection dans les Alpes du Nord françaises : typologie générale des structures et méthode descriptive, analyse de la stabilité des peuplements et interventions sylvicoles. CEMAGREFONF. 220 p.

Participants aux réflexions du groupe de travail et co-auteurs du document de synthèse

Benjamin Lange – Bureau fédéral de l'environnement – Division de la prévention des risques (Suisse)

Margarete Wöhrer-Alge, Rudolf Schmidt, Wolfgang Gasperl – Service pour le contrôle des torrents et des avalanches (Autriche)

Pier Paolo Macconi – Province Autonome de Bolzano – Département de génie hydraulique (Italie) Sitki Eraydın, Musa Kaya – OGM - Département de la conservation des sols et de la réhabilitation des bassins versants (Turquie)

Alison Evans et Jérôme Liévois - ONF - Service RTM74

Quentin Delvienne – ONF International



Forêt à fonction de protection contre les chutes de blocs

Dépérissement massif de peuplement de chêne : to cut or not to cut ? Analyse de suivis sanitaires à Vierzon

Depuis des décennies, le chêne pédonculé a connu des épisodes de dépérissement en forêt de Vierzon mais, au début des années 2000, le phénomène s'est intensifié et amplifié de façon brutale, affectant aussi le chêne sessile. On s'est alors demandé si, en plus les multiples facteurs prédisposants, le fait de récolter des chênes dépérissants avant qu'ils se déprécient n'aurait pas un effet aggravant. Une expérimentation a été réalisée pour tester cette hypothèse : la réponse est plutôt non, sous certaines conditions. Cet article met aussi l'accent sur les limites d'une telle expérimentation, et sur la difficulté d'analyser les données de suivi sanitaire, qui requièrent une méthode statistique très sophistiquée.

Dépérissement : l'importance des facteurs prédisposants

Le dépérissement des forêts est la conséquence de nombreux facteurs. Il ne suffit pas d'un événement comme une sécheresse ou une attaque d'insectes pour provoquer le déclin de peuplements : ces éléments ne sont souvent que des déclencheurs (Landmann, 1994). Leur effet sur les peuplements est fortement conditionné par de nombreux facteurs dits « prédisposants ». Il peut s'agir du niveau d'adaptation de l'essence à la station où elle se trouve, d'une compétition trop forte ou encore d'une répétition d'événements affaiblissant les individus. On en a eu l'illustration en forêt domaniale de Vierzon, dans le Cher, avec l'épisode de dépérissement qui a marqué les peuplements de chêne sur station acidiphile hydromorphe au cours de la période de 1999 à 2006. Le projet Dryade, dirigé par l'INRA suite à cet épisode, a mis en lumière de nombreux facteurs prédisposants chez ces peuplements: la plupart des arbres souffrait déjà depuis plusieurs décennies de ces sols pauvres, de l'asphyxie due à l'engorgement et au tassement des sols, des attaques d'oïdium des années 1997 à 2000, mais surtout du stress hydrique caractéristique de ces stations. En effet, l'enracinement peu profond, limité par la remontée de nappe en hiver, et les faibles précipitations caractéristiques du secteur ligérien (600-750 mm/an) rendent ces stations plus sujettes aux sécheresses estivales. Les fortes sécheresses des années 1990 et de la période de 2003 à 2006 n'ont donc fait que déclencher cet aspect visible du dépérissement des peuplements poussant dans des conditions contraignantes.

Connaissant l'existence de ces facteurs et face à la menace du changement climatique, à propos duquel le GIEC prévoit une augmentation de la température moyenne mais aussi une plus forte fréquence d'événements extrêmes comme les sécheresses similaires à 2003, les adaptations de la sylviculture proposées par les chercheurs se tournent surtout vers la diminution de l'exposition aux risques et de la vulnérabilité des peuplements (Legay, 2006). Parmi ces pistes d'adaptation, on peut citer notamment les itinéraires sylvicoles moins denses pour diminuer le stress hydrique des individus, la sélection de provenances plus méridionales, génétiquement mieux adaptées à la sécheresse, voire un changement d'essence pour les cas d'espèces peu adaptées à leur station. C'est ce qui est appliqué à Vierzon où les parcelles de chêne les plus contraintes par l'engorgement ont fait l'objet d'une conversion par plantation de Pins sylvestre et maritime.

Cependant, cette gestion de la vulnérabilité ne peut s'appliquer instantanément sur les peuplements déjà en place : face à des peuplements de chêne encore en amélioration pour quelques décennies avant d'être récoltables, il faut savoir gérer un épisode de dépérissement massif. À Vierzon, la première étape avait été d'exploiter tous les arbres dépérissants avant qu'ils perdent leur valeur marchande. Mais les arbres restants ont dépéri à leur tour, ce qui avait fait opter pour une véritable gestion de crise avec récolte anticipée des parcelles les plus touchées. Avec cette évolution, il devenait difficile de définir la part de responsabilité, dans le dépérissement des tiges restantes, entre les facteurs prédisposants

(notamment leur vitalité déjà faible), la qualité de l'exploitation (tassement) et l'impact de l'espacement des houppiers avec une circulation d'air plus importante entre arbres et donc a priori un régime hydrique accéléré. Ce dernier aspect, notamment, a suscité de nombreux débats. C'est dans l'objectif de quantifier l'impact d'une éclaircie sur le dépérissement que l'ONF a installé en forêt de Vierzon, courant 2008, un essai expérimental consistant à réaliser différents niveaux de prélèvement dans un peuplement de chêne dépérissant et à suivre l'évolution de l'état sanitaire des tiges restantes.

Après éclaircie, un suivi par notation DEPEFEU

Le dispositif

Le dispositif expérimental a été installé sur 12 ha, dans une futaie régulière (vraie) de chêne de 140 à 150 ans arrivée à maturité et conservée comme îlot de vieillissement, sur une station acidiphile sans hydromorphie marquée. Ce peuplement, de 27 m²/ha de surface terrière initiale, est composé de chêne sessile (60 % de la surface terrière) et de chêne pédonculé (40 %), avec un sousétage de hêtre, et compte parmi les belles qualités de la forêt de Vierzon. Cependant, il montrait en 2008 des signes de dépérissement. Une éclaircie a été réalisée au cours de l'hiver 2008/2009, avec différents niveaux de prélèvement, afin de comparer l'effet de ces éclaircies sur l'état sanitaire des tiges restantes. Des cloisonnements ont été ouverts pour éviter le tassement du sol. Il y a trois modalités contrastées appliquées à trois parties de la parcelle : absence d'éclaircie, prélèvement de 4 m²/ha, prélèvement de 8 m²/ha. Un réseau de 43 placettes circulaires de 12 ares a été installé selon un maillage systématique, placettes dans lesquelles tous les chênes ont été inventoriés et ont fait l'objet pendant 6 ans, de 2008 à 2013, d'une évaluation sanitaire annuelle selon le protocole de notation DEPEFEU (encadré 1).

1 - La notation DEPEFEU 9 critères

La notation DEPEFEU (Dépérissement des Feuillus) vise à évaluer l'état sanitaire de l'arbre selon un protocole du Département Santé des Forêts (Nageleisen, 2012) qui se base sur l'aspect du houppier et plus particulièrement le déficit foliaire et la mortalité d'organes pérennes. Ces facteurs intègrent à la fois la vitalité actuelle de l'arbre (feuillage plus ou moins transparent, mortalité des branches) mais aussi au cours des années précédentes (échancrure correspondant à une chute récente de branches mortes, feuilles en paquets traduisant la reconstitution du houppier suite à la mortalité de petites branches...). Cette notation se base sur 9 critères de description de la partie supérieure du houppier, notés chacun de 0 – absence du caractère observé – à 4 – présence du caractère sur la totalité de la partie observée du houppier (voir tableau). Les notes DEPEFEU, calculée en fonction de ces 9 critères, vont ainsi de 0 – arbre en parfaite santé – à 4 – arbre moribond.

Critère de notation	Indices intermédiaires	Calcul de la note DEPEFU
TF : présence de fenêtre	IT : Notation de	
TE : présence d'échancrure	transparence $IT = \frac{TF}{6} + \frac{TE}{3} + \frac{TG}{2}$	
TG : transparence globale	6 3 2	
FF : rameaux en fouet	IF : Notation masse	
FP : rameaux en paquet	foliaire $IF = \frac{FF}{6} + \frac{FP}{3} + \frac{FR}{2}$	$DEPEFEU = \left[\left(\frac{4-IM}{4} \right) X \left(\frac{IT+IF}{2} \right) \right] + IM$
FR : perte de ramifications secondaires	6 3 2	
MR : mortalité des rameaux	IM : notation de	
MB : mortalités des branches	mortalité $IM = \frac{MR}{6} + \frac{MB}{3} + \frac{MG}{2}$	
MG : mortalité globale	6 3 2	

Critères d'estimation de la note DEPEFEU et formule de calcul

Les notations DEPEFEU nécessitent un étalonnage entre opérateurs en début de campagne. Pour éviter les effets notateurs lors de cette expérimentation, les notations DEPEFEU ont été réalisées en équipe de 2, avec au moins un observateur commun à la campagne précédente afin d'éviter également des effets « campagne de mesures ».

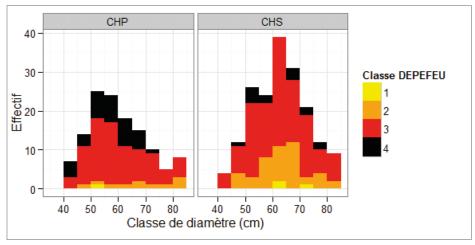


Fig. 1 : Distribution des classes de diamètres des tiges suivies et du DEPEFEU initial (2008) regroupé par classe

1.1.1

Ce suivi a été fait sur la totalité des 345 chênes restant après éclaircie dans les placettes circulaires.

On dispose donc, au niveau placette, des densités et surfaces terrières avant et après éclaircie, ainsi que de la surface terrière prélevée. En pratique, le prélèvement varie selon les placettes de 0 à 12 m²/ha. Pour chaque arbre, on a l'essence et le diamètre (ou la circonférence) ainsi qu'un indicateur quantitatif de dominance : il s'agit de la surface terrière cumulée des tiges qui sont plus grosses que l'arbre sur la placette $(G_{dom} en m^2/ha)$. Plus l'indice est élevé, plus l'arbre est dominé; à l'inverse, un G_{dom} de 0 signifie qu'il est le plus gros de la placette.

État initial des tiges

Pour l'intérêt expérimental, des chênes des deux essences, de tous diamètres et de tous états sanitaires, ont été laissés en place (sauf tiges moribondes, retirées en priorité). Après intervention, la gamme de diamètre représentée pour chacune des deux essences dans chaque modalité est donc large et surtout identique entre essences : de 40 à 85 cm de diamètre (figure 1). Concernant les états sanitaires initiaux, les sessiles (CHS) sont en très grande majorité de classe 3 puis 2, légèrement en meilleur état sanitaire que les pédonculés (CHP) pour lesquels on a surtout des classes 3 voire 4. Avec une telle proportion de tiges en mauvais état sanitaire (DEPEFEU 3 et plus), ce peuplement peut être qualifié de très dépérissant d'après les critères du Département Santé des Forêts.

Par ailleurs, on constate qu'une relation existe entre la taille des tiges et l'état sanitaire chez le pédonculé : les gros pédonculés sont globalement en moins mauvaise santé que les moyens et les petits qui présentent plus de tiges en classe 4 de DEPEFEU. Il est toutefois impossible de dire si c'est à cause d'une meilleure résistance à la sécheresse ou d'une moindre

2 – La méthode des Forêts Aléatoires et son utilisation dans cette expérimentation

La méthode des Forêts Aléatoires... n'a rien à voir avec nos forêts : pas de chêne, de parcelle ni de bûcheron. Il s'agit d'une méthode statistique qui interprète une variable X, ici le DEPEFEU, selon une multitude de variables explicatives Yi, qualitatives ou quantitatives (Genuer, 2014).

À la base, il y a un algorithme qui divise progressivement, par étape, un échantillon en sous-groupes de manière dichotomique. Chaque séparation d'un groupe d'individus en deux se fait à chaque fois selon la variable Yi qui explique le mieux des différences de valeurs de X au sein de ce groupe. Pour un échantillon et une série de variables, cette manière de procéder aboutit à une unique arborescence que les statisticiens, poètes, ont appelé « arbre » CART (Classification and regression tree). Dans cet algorithme, les variables Yi séparant les sous-groupes le plus précocement dans l'« arbre » sont a priori celles qui ont le plus d'influence dans l'explication de la variable X. Cet « arbre » CART est cependant très instable dès qu'on modifie l'échantillonnage : les variables Yi utilisées et leur ordre pour diviser l'échantillon peuvent être complètement modifiés.

Pour stabiliser ces critères de tri, on réalise plusieurs « arbres CART » sur différents échantillons dits « bootstrap » (sous-échantillons d'individus tirés aléatoirement dans l'échantillon de départ), en n'utilisant à chaque séparation qu'une partie des variables tirée au sort. On obtient ainsi une multitude d'« arbres » issus du même échantillon de base mais tous différents car ayant une part d'aléatoire. Cet ensemble, les poètes-statisticiens l'ont nommé « Forêt Aléatoire ». Cette Forêt Aléatoire constitue un modèle (elle permet de déduire la valeur X d'un individu à partir de ses valeurs Yi, avec un risque d'erreur), validé par le bootstrap, mais très lourd, complexe et par conséquent difficilement applicable à d'autres individus. Toutefois, comme tout modèle, il donne une erreur globale, c'est-à-dire la différence entre les valeurs prédites par ce modèle et les valeurs réelles des individus de l'échantillon : plus l'erreur est faible, plus le modèle est précis. En appliquant ce modèle alternativement avec puis sans l'une des variables Yi puis en comparant l'erreur issue de ces deux prédictions, on peut définir l'« importance » de chaque variable Yi : si l'erreur augmente fortement lorsqu'on retire une variable Yi, c'est qu'elle est importante pour expliquer la variable X. Ce système permet donc de hiérarchiser nos variables Yi selon l'importance qu'elles ont pour expliquer le DEPEFEU.

Cependant, l'utilisation de la méthode suppose obligatoirement l'indépendance entre individus, indépendance que l'on n'a évidemment pas entre les arbres d'une même placette (nos vrais chênes, cette fois-ci!). Pour pallier ce problème, ce n'est donc pas une mais 500 Forêts Aléatoires, faites à chaque fois avec un échantillon différent, constitué en tirant au sort une tige par placette (les tiges de l'échantillon sont cette fois-ci indépendantes). Chaque Forêt Aléatoire, constituée de 100 « arbres aléatoires », donne une valeur d'importance pour chaque variable. C'est donc la médiane et la distribution des 500 valeurs d'importance par variable Yi qui seront utilisées pour les hiérarchiser (figures 4, 7 et 10).

sensibilité aux difficultés stationnelles (en tous les cas, elle n'est pas due à l'intervention : l'histogramme avant intervention a la même forme). Pour le sessile, il n'y a pas de relation aussi nette mais on constate tout de même qu'il y a proportionnellement plus de tiges de classe DEFEFEU 2 dans les diamètres intermédiaires. Cela rejoint une observation faite lors du projet

Dryade: lors de leur croissance, les tiges sessiles qui étaient codominantes lorsque le peuplement était plus jeune et qui ont aujourd'hui logiquement les diamètres intermédiaires ont constitué plus de réserves en amidon que les dominantes, qui n'ont fait que pousser. Ainsi, quand la bise est venue, les fourmis ont mieux résisté que les cigales.

Méthode d'analyse

L'étude statistique initialement prévue s'est trouvée compliquée à réaliser. Tout d'abord, la note DEPEFEU (on dira par la suite le DEPEFEU) n'est pas une variable additive comme une surface terrière ou une hauteur : hors de question de faire une moyenne par placette, ce qui cacherait d'ailleurs les disparités, ou de calculer un accroissement de DEPEFEU pour une tige. De plus, les arbres sont dépendants les uns des autres - chaque arbre a une influence sur la croissance de son (ses) voisin(s) – et de nombreux facteurs peuvent agir sur l'état sanitaire : taille des tiges, compétition initiale, surface terrière prélevée... Difficile de faire des tests statistiques simples en utilisant directement les arbres comme individus. Enfin, même si les placettes permettent d'avoir un aperçu localisé de la compétition et des prélèvements, la spatialisation n'est pas assez précise pour faire une étude de type arbre dépendant des distances.

L'analyse ne peut donc être que qualitative, et on utilise pour cela une technique d'analyse statistique relativement récente : les Forêts Aléatoires (encadré 2). Cette méthode permet de hiérarchiser les variables explicatives (correspondant aux données relevées ou calculées

sur les placettes – tableau 1) selon leur importance pour expliquer le DEPEFEU. Après cette sélection, une analyse graphique a été faite pour voir comment ces variables agissent sur le DEPEFEU. Il faut enfin préciser que, vu leurs différences initiales, les chênes sessiles et pédonculés ont été analysés séparément.

Résultats

Une amélioration des états sanitaires

En premier lieu, l'évolution de l'état sanitaire est principalement influencée par l'année de mesure, toutes dimensions et toutes modalités confondues : après une année 2008 aux notations pessimistes, les autres mesures se montrent plus favorables, et ce dès l'année 2009 (figure 2). Cela n'a rien à voir avec l'intervention (l'amélioration a lieu également dans les placettes non éclaircies) ni avec les notateurs (un même agent présent d'une campagne sur l'autre), mais c'est simplement dû à une amélioration généralisée des houppiers : globalement, les branches mortes de 2008 sont tombées (indice IM dont la médiane passe de 2 à 1 voire moins pour les deux essences). À la suite de cette chute du DEPEFEU, les fluctuations des années suivantes sont modérées. On peut simplement noter

une nouvelle augmentation pour le pédonculé en 2012 : cette année-là, suite à une attaque d'oïdium au printemps, cette espèce a fait de la microphyllie (indice IT élevé). Quant au chêne sessile, suite à une légère réapparition de mortalité dans les petites branches en 2010 (augmentation de IM et de IF), les arbres ont repris leur « remise en état » en 2013, après la chute des branches mortes.

L'état de santé des chênes s'améliore donc globalement, en grande partie grâce à des saisons de végétation plus favorables : après la période de 2003 à 2006, aux forts dépérissements et aux sécheresses estivales marquées, les forêts ont moins souffert de la sécheresse entre 2007 et 2013 (sauf 2009 mais de façon moindre par rapport à la période précédente) (Nageleisen, 2014). La durée de résilience des houppiers explique leur état encore critique en 2008. Quant à la légère dépréciation des houppiers entre 2009 et 2010, elle peut être due à cette sécheresse de 2009. L'état médiocre d'un peuplement suite à des événements comme la sécheresse ou des défoliations précoces n'est donc pas rédhibitoire lorsque les conditions redeviennent plus favorables. Cependant le houppier met un certain temps à se régénérer.

Information	Variable	Définition
Exploitation	G.expl_ch	Surface terrière de chêne exploitée (m²/ha)
Dimension arbre	C130.09	Circonférence à 130 cm en 2009
Dominance	Gdom.08 et Gdom.09	Surface terrière des tiges de la placette plus grosses que l'individu, avant et après intervention (m²/ha)
Peuplement avant	G.av_ch	Surface terrière de chêne avant intervention (m²/ha)
	N.av_ch	Densité de chêne avant intervention
Peuplement après	G.ap_ch	Surface terrière de chêne après intervention (m²/ha) (calculé en 2009, sur mesures plus précises)
	N.ap_ch	Densité de chêne après intervention
État initial	Depefeu.08	Notation DEPEFEU initiale en 2008

Tab. 1 : Variables présélectionnées utilisées pour modéliser le DEPEFEU dans les Forêts Aléatoires

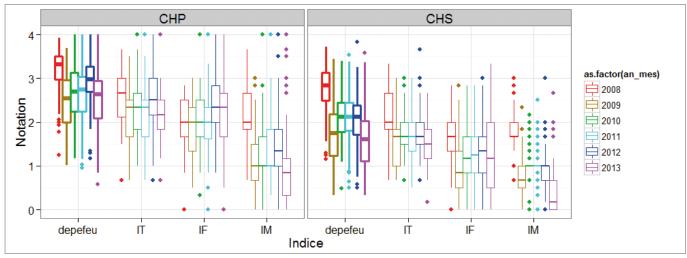


Fig. 2 : évolution annuelle des distributions de DEPEFEU et des sous-indices IT, IF, IM de toutes les tiges non éclaircies du dispositif

IT = Transparence, IF = Masse foliaire, IM = Mortalité. Rappel : une notation élevée représente un état sanitaire dégradé.

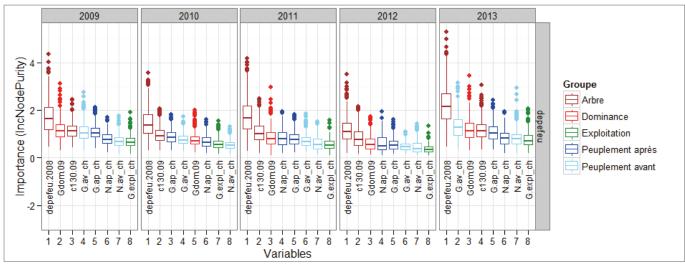


Fig. 3 : importance des variables (cf. tableau 1) pour expliquer le DEPEFEU de chaque année pour le chêne pédonculé

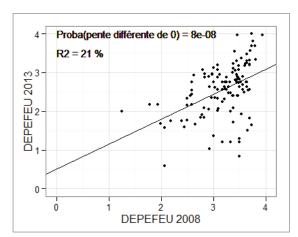


Fig. 4 : relation entre les DEPEFEU initial (2008) et final (2013) pour le chêne pédonculé.

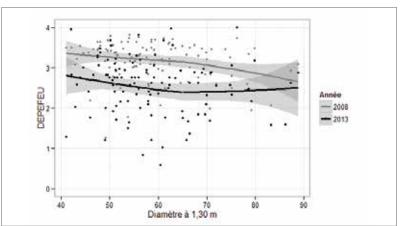


Fig. 5 : évolution de la relation entre la circonférence et le DEPEFEU des chênes pédonculés (comparaison de cette relation pour les années 2008 et 2013)

Les courbes et les surfaces grisées représentent des régressions polynomiales avec une pondération locale – loess – de degré de lissage 1 et leur intervalle de confiance à 95 %

Le pédonculé : les plus gros restent les mieux portants

Pour le chêne pédonculé, la réalisation des Forêts Aléatoires montre que le DEPEFEU reste principalement et durablement influencé par l'état sanitaire initial de la tige (figure 3): après 5 ans, les tiges initialement mal en point restent les plus dépérissantes du peuplement alors que celles en meilleure santé conservent un avantage sur les autres (figure 4). Mieux vaut exploiter les pédonculés en moins bonne santé.

Conséquence de cette conservation de hiérarchie, la taille des tiges (c130,09) et leur dominance (Gdom.09) figurent presque systématiquement parmi les variables les plus importantes après le DEPEFEU initial. Globalement, les tiges les plus grosses restent les tiges en meilleure santé (figure 5). Pour les autres variables, leur importance varie d'une année sur l'autre, traduisant plus un effet placette et une absence d'influence durable de ces variables. Pour ce qui concerne la surface terrière exploitée, peu de pédonculés ont été suivis dans les placettes au prélèvement supérieur à 6 m²/ha : on ne peut donc pas vraiment en tirer de conclusion sur l'effet des prélèvements, si ce n'est qu'il n'y a pas de différence d'évolution de l'état sanitaire entre une absence d'intervention et un prélèvement inférieur à 5 m²/ha.

Le sessile : exploiter, oui, mais pas trop

Pour le chêne sessile, les relations sont différentes, avec une évolution dans la hiérarchie des variables. Entre 2009 et 2013, l'état sanitaire initial mais aussi la grosseur des tiges et leur dominance perdent de l'influence par rapport aux autres variables (figure 6). Ainsi, la corrélation entre le DEPEFEU de 2008 et celui de 2013 est plus faible que pour le pédonculé, et il n'y a d'ailleurs plus aucune corrélation entre les deux pour les arbres des placettes non éclaircies (figure 7).

À l'inverse, si le niveau d'exploitation (G.expl_ch et donc G.ap_ch) a initialement peu d'effet, il gagne progressivement de l'importance, au point d'être en 2013 plus déterminant que le DEPEFEU initial : après 5 ans, l'état sanitaire de l'arbre est donc plus influencé par le niveau de l'intervention que par son état lors de l'éclaircie ou par sa taille. C'est alors globalement dans les placettes à fort prélèvement (6 m²/ha et au-delà)

qu'on trouve les arbres en moins bon état, suite à une moins bonne récupération (figure 8). Toutefois, il ne faut pas conclure qu'une intervention contribue à aggraver l'état sanitaire: tant que le prélèvement est inférieur à 6 m²/ha, les arbres sont globalement d'un état sanitaire similaire à ceux de la modalité sans intervention. Les différences liées au niveau de prélèvement restent toutefois moins grandes que les variations interannuelles.

Croissance radiale des tiges : un effet seuil du DEPEFEU

En plus du suivi de l'évolution sanitaire des tiges, le dispositif permet d'étudier l'effet du dépérissement sur la croissance en grosseur des tiges grâce aux mesures de circonférence faites en 2009 et 2012. Or, l'accroissement des tiges d'un peuplement régulier est lié en premier lieu à la taille des tiges : dans un peuplement, les gros arbres sont généralement ceux qui poussent le plus vite. Une étude de l'accroissement en fonction de l'état sanitaire montrerait ainsi par exemple qu'un pédonculé en bonne santé pousse mieux, mais ce serait surtout parce qu'il fait partie des plus gros. On étudie donc les variations d'accroissement une fois

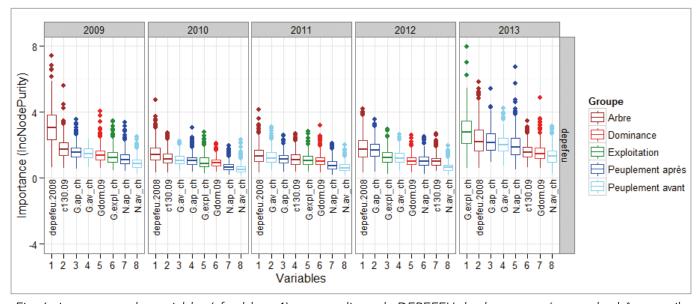


Fig. 6 : importance des variables (cf. tableau 1) pour expliquer le DEPEFEU de chaque année pour le chêne sessile

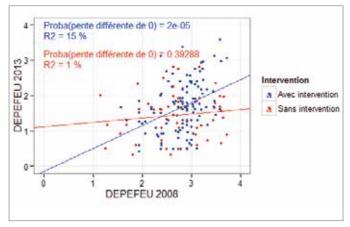


Fig. 7 : relation entre les DEPEFEU initial et final pour le chêne sessile

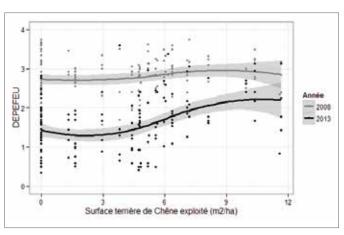


Fig. 8 : évolution de la relation entre le prélèvement et le DEPEFEU des chênes sessiles

enlevé l'effet de la taille de la tige. Ces variations correspondent aux résidus de la régression linéaire de l'accroissement individuel en surface terrière des tiges par leur circonférence (Dhôte, 1999).

On procède donc à un ensemble de Forêts Aléatoires en intégrant l'état sanitaire parmi les variables explicatives de ces résidus. Afin d'alléger la modélisation, on utilise la moyenne par tige des notes DEPEFEU de 2008 à 2013 (l'évolution dans la hiérarchie des tiges en terme de dépérissement a été faible, sauf pour les sessiles non éclaircis). Ce calcul donne une moyenne de la position de chaque tige dans la hiérarchie sanitaire, de la tige en meilleure santé (valeur la plus faible) à la tige en moins bonne santé (valeur la plus forte).

Pour les deux espèces, la santé moyenne des tiges au cours de la période de croissance fait partie des deux variables, avec l'indice de dominance, qui ont le plus d'importance pour expliquer les variations de croissance radiale pour une dimension donnée (figure 9). De plus, toujours pour les deux chênes, cet effet se traduit globalement par un seuil, un niveau de DEPEFEU au-delà duquel la croissance subit une chute manifeste. Pour les arbres dont le DEPEFEU est inférieur à ce seuil. l'effet de l'état sanitaire sur la croissance est moindre (figure 10).

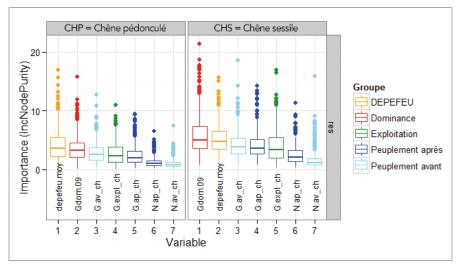


Fig. 9 : importance des variables pour expliquer la part d'accroissement en surface terrière non expliquée par la circonférence de l'arbre

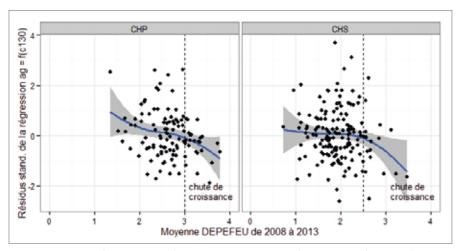


Fig. 10: Relation entre le DEPEFEU moyen des tiges et les résidus standardisés de la régression linéaire estimant l'accroissement en surface terrière (ag) en fonction de la circonférence (c130) – part de l'ag non expliquée par la taille de la tige – pour les deux chênes

Cependant, il est impossible de donner une valeur précise de ce seuil, vu que les fluctuations interannuelles sont trop fortes. Si on prend les mesures de 2009, c'est à partir des valeurs DEPEFEU de 2,5-3 que la croissance des arbres a commencé à ralentir. Lors d'une étude dans le cadre du projet Dryade, l'INRA avait trouvé un seuil similaire, au-delà duquel les tiges ont du mal à se remettre d'une sécheresse.

Enfin, on observe aussi un léger effet de la dominance chez les sessiles où l'arbre le plus dominant de chaque placette pousse logiquement le plus vite. Quant aux autres variables, elles ont beaucoup moins d'influence, notamment le niveau d'éclaircie : la croissance d'un peuplement âgé comme celui-ci met toujours du temps avant de réagir à une intervention.

Conclusions

Dix ans après la vague de dépérissement qui a touché la forêt de Vierzon, cet essai donne une information sur l'évolution de l'état sanitaire de ces chênaies qui, globalement, vont mieux. Grâce à une série de saisons de végétation plus favorables du point de vue du climat et de la sécheresse estivale (Nageleisen, 2014), les chênes sessiles et pédonculés se sont globalement « refait une santé », indépendamment des éclaircies.

Remarque importante

les indications de prélèvement données ci-après sont à considérer à l'échelle d'environ 12 ares. On n'est pas ici dans un cadre de consignes sylvicoles « standard » à l'échelle de l'unité de gestion ou, à l'inverse, à celle de l'arbre et de son environnement immédiat.

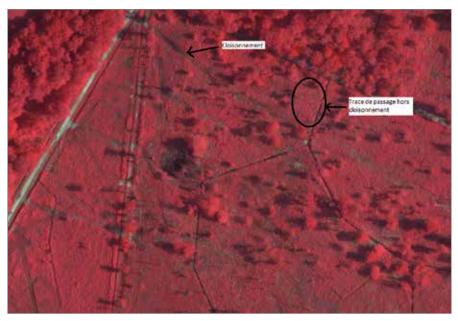


Fig. 11 : orthophotographie d'une parcelle exploitée en FD de Vierzon suite à l'épisode de dépérissement : de nombreuses traces de tracteur en dehors des cloisonnements

Récolter des dépérissants? A priori sans danger pour les arbres restants mais...

Pour ce qui est de la gestion d'un peuplement de chêne dépérissant, la récolte de tiges ne présente pas de danger pour les tiges restantes, à condition de ne pas dépasser un certain niveau de prélèvement, de l'ordre de 5 m²/ha, et de respecter des sols grâce aux cloisonnements. Le dépérissement des arbres restants suite aux coupes en début de période de crise est probablement plus à imputer à la poursuite des sécheresses estivales, à une exploitation sans respect des cloisonnements qui a entrainé un tassement sur une grande surface de parcelle (figure 11) ou tout simplement à des réserves déjà faibles pour ces tiges. On arrive là à la limite de cet essai sans répétition dans un contexte climatique favorable et sur une station favorable : il faut se montrer prudent si on extrapole ces résultats à d'autres sites, notamment des stations plus hydromorphes, et on ne peut pas dire comment se comporteraient les arbres lors d'une période de croissance présentant à nouveau des sécheresses estivales marquées.

Mais alors, quels arbres couper?

Pour le pédonculé, la situation est simple: globalement, avec son caractère plus héliophile, les arbres les plus gros et les plus dominants sont aussi ceux qui présentent la meilleure santé. La hiérarchie entre tiges basée sur leur état sanitaire ne varie pas au cours des 6 années favorables, qu'il y ait eu ou non une intervention : les arbres initialement en meilleure santé (a priori les plus gros) gardent les meilleurs DEPEFEU. De plus, l'intervention et son intensité (plafonnée pour cette essence à 5 m²/ha par manque de données au-delà de ce niveau de prélèvement) n'ont pas de conséquence sur le dépérissement par rapport au témoin.

Enfin, la croissance radiale subit une chute à partir d'un certain niveau de dépérissement. Avec tous ces éléments, pour le chêne pédonculé, mieux vaut couper sans hésitation les arbres les plus dépérissants, a priori les plus petits, avant qu'ils ne se dégradent, dans la limite de 5 m²/ha (au-delà, on ne sait pas comment ils réagissent).

Pour le sessile, ce prélèvement maximum de 5 m²/ha s'applique aussi, mais il est plus difficile de trancher entre les tiges : celles en meilleure santé sont les co-dominantes qui ont pu faire des réserves pendant leur croissance, tandis que les dominantes ont tout misé sur leur développement et ont moins de réserves. Toutefois, au cours de ces 6 années, les sessiles ont montré une forte capacité à se rétablir au cours d'une période favorable (très probablement due aussi à leur état initial, moins critique que pour le pédonculé), au point parfois de modifier la hiérarchie sanitaire entre tiges. Il semblerait toutefois, d'après le projet Dryade, que l'état futur des sessiles ne soit pas défini uniquement d'après leur état sanitaire apparent (DEPEFEU) mais également d'après leurs réserves en amidon, dont l'évaluation nécessite des outils spécialisés. Par conséquent, il n'y a pas forcément de consignes à donner sur un type de tiges à retirer en priorité (sauf les moribondes) et on peut parier sur le chêne sessile, même sur des tiges pas forcément les mieux portantes.

Stratégie lors des prochains dépérissements

En conclusion, dans un peuplement de chêne dépérissant, sessile et/ou pédonculé, ce type d'intervention peut être vu comme une première étape pour exploiter les tiges moribondes avant que leur valeur marchande se dégrade. Si le dépérissement se poursuit ultérieurement dans le reste du peuplement, on pourra passer à une gestion de type crise (récolte anticipée et éventuellement changement d'essence) : c'est ce qui a été fait à Vierzon. Le prélèvement des arbres mal en point ne serait pas responsable de la poursuite d'un dépérissement, à condition de respecter certaines règles : bien utiliser les cloisonnements (les créer si ce n'est déjà fait) pour éviter le tassement et ne pas dépasser un prélèvement de l'ordre de 5 m²/ha. Sur les stations acidiphiles à engorgement temporaire, on privilégiera la conservation des sessiles, plus adaptés aux conditions de sécheresse estivale et qui semblent pouvoir se remettre plus facilement. En cas de zone exclusivement composée de pédonculé, on conservera les dominants plutôt que les plus petits. Cette intervention reste un pari : si les saisons suivantes sont plus favorables, le peuplement pourra se remettre et on aura évité la perte économique des dépérissants (Legay, 2006). Par contre, si de nouvelles sécheresses surviennent - hypothèse très probable, leur fréquence étant appelée à augmenter du fait du changement climatique –, l'état sanitaire risquera de connaître une nouvelle dégradation, conduisant à une gestion de type crise; situation fâcheuse, mais qu'une absence d'intervention n'aurait probablement pas permis d'éviter.

Quentin GIRARD

ONF, département RDI (désormais responsable de l'Arboretum National des Barres)

Remerciements

Merci aux relecteurs qui ont contribué à améliorer cet article. Et comme un essai R&D est installé puis suivi de longues années avant de porter ses fruits, merci aux anciens de la R&D qui ont installé et suivi cette expérimentation.

Références

Dhôte J.-F., 1999. Compétition entre classes sociales chez le Chêne sessile et le Hêtre. Revue Forestière Française, vol. 51 n° 2, pp.309-325

Genuer R., mai 2014. Formation forêts aléatoires et sélection de variables. 32 p.

Landmann G., 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. Revue Forestière Française, vol. 46 n° 5, pp. 405-415

Legay M., Ginisty C., Breda N., hiver 2006. Que peut faire le gestionnaire forestier face au risque de sécheresse? Rendez-Vous Techniques, n° 11, pp. 35-40

Nageleisen L.-M., 2012 (actualisation de la version de 1998). Guide de notation de l'aspect du houppier des arbres feuillus dans un contexte de dépérissement (protocole DEPEFEU). Département Santé des Forêts. 18 p.

Nageleisen L-.M., 2014. Bilan de la santé des forêts en 2013. Quelques indicateurs de la santé des forêts françaises (1989-2013). Département Santé des Forêts. 2 p.



Peuplement affecté par le dépérissement : feuillage très incomplet, quelques chênes morts, beaucoup de lumière au sol.

Le réseau Amendement pour le suivi

sur le long terme de la restauration ou du maintien de la fertilité en forêt

Veiller à la fertilité des sols est une préoccupation d'importance au regard des services attendus de la forêt, pour la fourniture de bois matériau et bois énergie ou le stockage de carbone mais aussi comme réservoir et support de biodiversité. À l'échelle nationale, différents réseaux de monitoring aident à suivre l'évolution temporelle des sols et leur fertilité. Pour sa part, l'INRA a conduit depuis plus de 50 ans des expérimentations de fertilisation forestière (amendement minéral, engrais...) pour restaurer des sols dégradés ou soutenir la production; il ranime ses anciens essais, désormais constitués en réseau, pour mieux faire face aux enjeux.

es forêts tempérées françaises sont pour l'essentiel cantonnées sur les sols les moins propices à l'agriculture : sols « ingrats », hydromorphes, caillouteux, pentus... Ce sont bien souvent des sols acides, pauvres chimiquement, vulnérables à la dégradation de leur faible fertilité et ayant parfois subi des pratiques appauvrissantes par le passé (soutrage, surexploitation pour alimenter des manufactures...). Le maintien voire l'amélioration de la fertilité des sols forestiers n'est pas une préoccupation récente pour les gestionnaires.

Depuis les années 70, les crises énergétiques (qui remettent sur le devant de la scène l'intérêt du bois), les épisodes de pluies acides et le contexte actuel de changements globaux (climat, pollution, demande accrue en bois énergie et bois matériau) maintiennent une pression soutenue sur les peuplements et les sols forestiers. Exposés à des stress multiples, les écosystèmes forestiers peuvent alors connaître des dysfonctionnements susceptibles d'aboutir dans une étape ultime à leur dépérissement. Pour mieux comprendre et anticiper l'évolution des forêts françaises, il est important de pouvoir s'appuyer sur des réseaux de mesures (sols, peuplements...) sur le moyen – voire long – terme : dispositifs de monitoring, à l'exemple des réseaux RENECOFOR ou RMQS¹, mais aussi ensemble d'essais expérimentaux plus ou moins anciens permettant de tester des itinéraires de gestion des sols forestiers afin d'adapter les forêts aux contraintes et/ou d'atténuer les stress.

L'objectif de cet article est de présenter le réseau Amendement constitué par l'unité BEF (Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers) de l'INRA Nancy, sa genèse et ses évolutions, les avancées auxquelles les dispositifs constitutifs ont contribué ainsi que les potentialités d'un tel réseau pour des recherches en cours et futures.

Quelques définitions

Les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols

La pratique de l'amendement minéral en forêt consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium et/ou magnésium broyé (CaCO₃-MgCO₃). L'amendement a pour objectif premier une amélioration sur le long terme des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol en vue de favoriser son fonctionnement et plus généralement celui de l'écosystème. Cette pratique vise donc au maintien ou à la restauration de la fertilité minérale d'un écosystème forestier, l'amendement étant aujourd'hui majoritairement conseillé lorsqu'une déficience de la nutrition de peuplements est avérée (peuplements carencés et/ou dépérissants) ou pour contrecarrer les effets délétères d'une acidification marquée. L'apport de carbonate de calcium et/ou magnésium est parfois complété d'un apport de phosphore et/ ou de potassium afin d'éviter des déséquilibres nutritionnels.

Il ne faut pas confondre l'amendement avec l'**apport d'engrais** (N, P, K), qui s'inscrit dans une échelle de temps plus courte et dont l'objectif est de maintenir ou d'accroître le pool d'azote (N), phosphore (P) et potassium (K) disponible pour la plante, afin d'augmenter la production végétale.

¹ Réseau de mesure de la qualité des sols (http://acklins.orleans.inra.fr/programme/rmqs/rmqs.php)

Historique des essais expérimentaux

Les premières expérimentations françaises de fertilisation forestière datent de la fin des années 60, sous l'impulsion de M. Bonneau (directeur de la Station de Recherche sur les Sols Forestiers et la Fertilisation et enseignant à l'ENGREF). La recherche forestière était alors imprégnée du modèle agronomique de l'époque, qui s'appuyait notamment sur la génétique et l'amélioration des pratiques et techniques culturales (apport d'engrais, lutte contre les pathogènes...) pour accroître la production.

M. Bonneau a consacré une partie de sa carrière à la compréhension de la relation « station – production » (par enquête puis expérimentation), l'objectif étant de définir une « station » optimale/idéale par essence. La connaissance de la station permet ensuite de bien choisir l'essence, en choisissant par exemple des essences frugales pour valoriser les sols pauvres chimiquement. M. Bonneau considéra qu'il était aussi possible d'adapter le sol aux exigences d'une essence et un large pan de ses recherches a été consacré à la fertilisation en forêt. Des essais d'apport d'engrais (N, P, K) avaient été mis en place dans des pays frontaliers (Allemagne, Belgique) dès le début du 20e siècle et cette pratique permettait des gains de production importants. La France était dépourvue d'essais rigoureux en matière de fertilisation et M. Bonneau installa à partir des années 1960 un ensemble de dispositifs, essentiellement en plantation, pour en étudier les effets.

Au cours des années 1970 des dépérissements de résineux sont constatés en Forêt-Noire, en Bavière, au sud de la Pologne, en Allemagne de l'Est et en Tchécoslovaquie de l'époque. Au début des années 1980, des symptômes de dépérissement des forêts sont observés dans plusieurs régions françaises (Vosges puis Ardennes...). Le programme

de recherche DEFORPA (1983-1995, Landmann et Bonneau, 1995) s'est intéressé à l'analyse des causes et aux recommandations pour gérer la crise et prévenir de nouveaux dommages. Les investigations ont notamment porté sur les relations entre pluies acides, dépérissement et fertilité des sols. Les essais de première génération (mentionnés ci-dessus) ont été réexaminés au regard de cette problématique, et de nouveaux essais ont été mis en place. Orientés sur l'amendement calco-magnésien (apport de Ca et Mg), ces nouveaux essais ont utilement complété les anciens, qui portaient plutôt sur les fertilisants N, P et K.

Constitution du réseau Amendement

Ces dispositifs ont connu depuis leur mise en place des périodes d'activité mais aussi de dormance, parfois de plusieurs années. Cependant ces « pauses » ne doivent pas les faire tomber dans l'oubli et leur suivi doit perdurer pour permettre d'avancer dans la compréhension du fonctionnement-dysfonctionnement des écosystèmes forestiers dans le contexte actuel de changements globaux (changements climatiques, besoin croissant en bois énergie...). Pour pérenniser et consolider ces dispositifs, l'INRA a décidé de les regrouper sous forme d'un réseau (Amendement), dont les principales caractéristiques sont décrites dans la suite de l'article.

État des lieux préalable

Un travail d'inventaire et de visite des sites expérimentaux a été réalisé de 2009 à 2013 par les équipes BEF (Biogéochimie des Écosystèmes forestiers) et UEFL (Unité Expérimentale Forestière Lorraine) de l'INRA Nancy. Certains n'avaient pas été suivis et/ou entretenus depuis plusieurs années et il était donc nécessaire de faire un état des lieux pour décider des dispositifs à pérenniser sur le long terme. Suite aux visites de terrain, les dispositifs ont été classés en

trois catégories: I) en état correct (24 dispositifs) II) en mauvais état (passage d'engins...) et/ou présentant des contraintes scientifiques et/ou technique fortes (parcelles unitaires de trop petite surface...) (8 dispositifs), et III) détruits ou très perturbés (aléas climatiques...) (8 dispositifs). À ce jour, plus de 25 dispositifs restent encore à visiter et évaluer.

Les sites inventoriés, leurs principales caractéristiques et leur état sont présentés dans les tableaux 1 et 2 (pages 22-23). Ce réseau regroupe différentes essences (chêne, hêtre, épicéa, sapin, douglas, pin), dont plusieurs peuvent être représentées sur un même dispositif. L'âge des peuplements à la mise en place des essais est très variable, tout comme les produits apportés (engrais, carbonates Ca ou Ca-Mg, gypse, scories...) et les doses administrées (de quelques dizaines de kg à plusieurs tonnes par hectare). L'emprise de chaque dispositif varie de 1 à 6 hectares, en fonction des modalités appliquées, du nombre de blocs, et de la taille des parcelles unitaires (de 0,01 à 1 ha); un exemple de plan d'expérimentation est présenté dans la figure 1. Les dispositifs en état correct ont été rénovés sur la période 2010-2013 (photo 1) : localisation précise des différentes placettes expérimentales, re-matérialisation à la peinture des limites des placeaux ainsi que des numéros d'arbre, inventaires en plein. Ils feront désormais l'objet d'un suivi régulier sur le long terme : passages périodiques sur site pour la maintenance (peinture...) et, selon les projets de recherche et a minima tous les 10 ans, pour suivre l'évolution des sols, des humus, ainsi que la croissance et l'état nutritionnel des peuplements. Pour les autres dispositifs, il sera toujours possible de travailler sur les échantillons et sur les données historiques, et de nouvelles données pourront éventuellement être acquises de façon ponctuelle dans le cadre d'un projet spécifique (en considérant bien entendu préalablement l'état du dispositif).



1 – Allure des placettes après remise en état (La Croix Scaille, 2009)

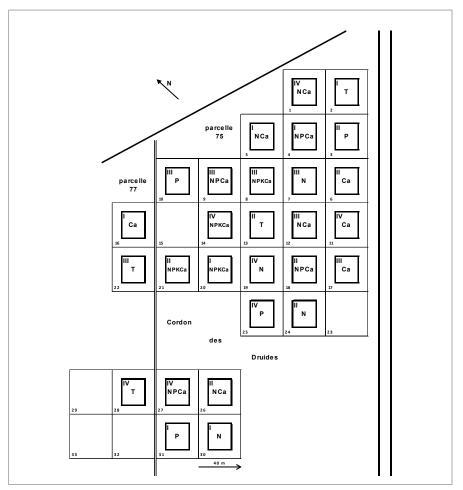


Fig. 1 : exemple du dispositif de Fougères, installé en 1972 pour tester l'effet de l'apport simple ou combiné de N, P, K et Ca sur la croissance d'une hêtraie

Ce dispositif comprend 4 blocs (I, II, III, IV) et 7 traitements (T : Témoin, N, P, Ca, NCa, NPCa, NPKCa). L'emprise globale est d'environ 5 ha. La gestion sylvicole est la même que pour les parcelles environnantes.

La gestion scientifique et technique de ce réseau est aujourd'hui assurée par l'unité BEF (avec l'UEFL jusqu'à sa fermeture en 2015), en collaboration avec les propriétaires des terrains ou leurs représentants (ONF, communes, propriétaires privés).

Les mesures réalisées, les bases de données et la conservation des échantillons anciens

À leur installation (avant l'apport des produits), les dispositifs ont généralement fait l'objet d'un « état initial » en bonne et due forme. Ils ont ensuite été mesurés de façon plus ou moins régulière selon les moyens techniques, humains et financiers disponibles pour réaliser les campagnes de prélèvements et les analyses physico-chimiques (sol, humus, peuplement). La fréquence des mesures varie donc bien souvent de l'un à l'autre et en fonction des paramètres suivis (liés aux objectifs initiaux et aux projets scientifiques successifs adossés aux dispositifs).

Différents compartiments de l'écosystème sont concernés (sol, humus, arbre et notamment les feuilles/ aiguilles, strate herbacée...), l'objectif principal étant d'étudier l'effet des produits apportés sur ces compartiments, et de façon plus globale sur l'écosystème. Cet effet peut être déduit des comparaisons entre les placettes ayant reçu le produit fertilisant et des placettes témoins (écosystème similaire en tout point, mais sans apport). L'évolution des compartiments et de l'écosystème peut ensuite être étudiée en comparant les mesures ou notations enregistrées lors des campagnes successives. Les caractérisations/déterminations les plus généralement réalisées sur les différents compartiments sont détaillées dans l'encadré en page 24.

N°	département et Localisation	Nom du Dispositif	Essence	Âge du peuplement à l'installation	Date d'installation du dispositif	т	N	P205	K20	CaO	MgO
8	Forêt Domaniale des Potées	Les Potées	Chêne Hêtre Douglas TSF	10-150	1995	*				*	*
8	Forêt Domaniale de Château-Regnault Parc 31 (ex 10)	La Croix Scaille Old	Épicéa commun	60	1980	*	*	*		*	*
8	Forêt Domaniale de Château-Regnault Parc 30 (ex 09)	La Croix Scaille dose	Épicéa commun	60	1990	*				*	*
22	Forêt Domaniale de Coat-an-Hay Parc 44, 45, 51, 55, 61	Coat-an-Hay	Chêne & Hêtre (10 ans) Douglas (10 ans) Pin Laricio (10 ans) Douglas (30 ans) Épicéa commun (30 ans) Épicéa de Sitka (30 ans)	10 ou 30	1995	*				*	*
22	Forêt Domaniale de Coat-an-Noz Parc 7	Coat-an-Noz	Hêtre	10	1995	*				*	*
35	Forêt Domaniale de Fougères Parc 75, 77	Fougères	Hêtre	60	1972	*	*	*	*	*	
41	Forêt Domaniale de Blois Parc 159	Blois	Chêne	Régé 5/6 ans	1981	*	*	*	*	*	*
41	Forêt Domaniale de Blois Parc 81	Blois	Chêne (régénération naturelle)	Régé	1981	*	*	*	*	*	*
58	Forêt Domaniale de Breuil-Chenue	Breuil	Douglas Épicéa commun Pin Laricio Sapin	0	1980						
61	Forêt Domaniale d'Andaines Parc 157	ONF_STIR Andaines	Pin Sylvestre (plantation)	0	1998	*		*	*	*	*
61	Forêt domaniale d'Ecouves Parc 61	ONF_STIR Ecouves	Chêne sessile (régénération)	-15	1998	*		*	*	*	*
67	Forêt Communale de Russ Parc 20	Russ	Sapin pectiné	105	1985	*	*	*	*	*	*
68	Forêt Communale du Bonhomme Parc 60, 71	Le Bonhomme (Cie)	Épicéa commun	50	1991	*	*	*	*	*	*
72	Forêt Domaniale de Sillé le Guillaume Parc 305	ONF_STIR Sillé-Le-Guillaume	Chêne sessile (plantation après résineux)	0	1997	*		*	*	*	*
72	Forêt Domaniale de Perseigne Parc 225	ONF_STIR Perseigne	Chêne sessile (régénération)	-15	1997	*		*	*	*	*
72	Forêt domaniale de Bercé Parc 133, 134	Bercé – les Trembles	Chêne	50	1970	*	*		*	*	*
72	Forêt Domaniale de Bercé	Bercé – Rond de May	Chêne	30	1968	*	*		*	*	*
72	Forêt Domaniale de Bercé	Bercé – Gaie Mariée	Chêne	30	1968	*	*		*	*	*
88	Forêt Domaniale de Darney Parc 453, 454	Darney	Hêtre	110	1972	*	*	*	*	*	*
88	Forêt Communale d'Humont	Humont	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné	35, 60	1991	*				*	*
88	Forêt Communale d'Humont	Humont	Hêtre	60	2005	*				*	*
88	Forêt Communale de Remiremont Parc 96, 99, 100	Remiremont	Sapin pectiné	100	1985	*	*	*	*	*	*
88	Forêt Domaniale de Cornimont Parc 18, 26, 27, 29, 30, 33, 66, 67, 68, 69, 71	Bassin Versant Cornimont	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné	0 à 200	2003	*				*	*
88	Forêt Domaniale de Senones Parc 100, 101, 103, 104, 105, 123, 124, 126, 127, 200, 202, 203, 204, 206	Bassin Versant Senones	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné Landes à Callune	0 à 150	2003	*				*	*

Tab. 1 : les dispositifs du réseau Amendement en état correct, avec les principales caractéristiques des sites

N° département et Localisation	Nom du Dispositif	Essence	Âge du peuplement à l'installation	Date d'installation du dispositif	т	N	P205	K20	CaO	MgO
8 Forêt domaniale des Manises	Revin	Épicéa commun	0	1986	*	*	*	*	*	*
8 Forêt domaniale de Château-Regnault	X-Scaille HéliMEAC	Épicéa commun	30	1991	*				*	*
8 Forêt domaniale de Sedan	Saint Menges	Douglas (plantation) Peuplements mélangés	0	1980	*	*	*	*	*	*
8 Forêt domaniale de Château-Regnault	X-Scaille (20, 22, 19, 21) Souflerie_Lhoist; RENECOFOR	Épicéa commun	30	1991	*				*	*
19 Forêt privée	Couturas	Douglas (après Épicéa commun)	40	1972	*	*	*	*	*	
41 Forêt privée	Aiguevives	Chêne (régénération naturelle)	0	1982	*	*	*	*	*	*
61 Forêt Domaniale de Perche-Trappe	Perche Trappe	Chêne	0	1987	*		*		*	*
67 Forêt Communale de Grendelbruch Parc 36, 37	Grendelbruch	Sapin pectiné	105	1985	*	*	*	*	*	*
8 Forêt Domaniale Château-Regnault	La Croix Scaille dose	Feuillus TSF	30; 150	1991	*				*	*
23 Forêt communale	Le Feix	Épicéa commun	40	1982	*	*	*		*	
33 Forêt privée	Pierroton	Pin maritime	14	1968	*	*	*	*	*	*
40 Forêt privée	Mimizan	Pin maritime	0	1957	*	*	*	*	(*)	(*)
43 Forêt Domaniale de Pinols	Pinols	Épicéa commun	58	1970	*	*	*	*	*	
57 Forêt domaniale d'Abreschwiller Parc 246	Grossmann	Épicéa commun	75	1985	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Domaniale de Mortagne Parc 14, 22	Mortagne	Sapin	70	1985	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Domaniale de Vologne Parc 42, 44	Vologne	Sapin	70	1985	*	*	*	*	*	*

Tab. 2 : les dispositifs du réseau Amendement en mauvais état ou présentant peu d'intérêt scientifique (orange clair) et détruit (orange foncé), avec les principales caractéristiques des sites



Prélèvement d'humus et carottage de sol

Caractérisations des différents compartiments de l'écosystème

- Analyses chimiques des sols, horizon par horizon (pédologique ou prédéfini) : pHeau, C, N, cations échangeables* K, Ca, Mg, Na et P assimilable. La densité apparente (ou masse volumique) et l'épaisseur des horizons permet ensuite de calculer les stocks du sol en éléments disponibles pour les plantes, c'est-à-dire facilement mobilisables (cations échangeables et P assimilable).
- Analyses chimiques des humus et évaluation des quantités de matière sèche à l'hectare. Les analyses permettent notamment de connaître la concentration en éléments totaux (K, Ca, Mg, P...). La quantité de matière sèche à l'hectare permet ensuite de calculer des stocks dans cette litière au sol.
- Analyses chimiques des feuilles ou aiguilles : C, N, S, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn. La feuille ou aiguille est un organe très actif et sa composition chimique peut donc renseigner sur l'état nutritionnel du peuplement en comparaison d'un état de nutrition optimale (Bonneau, 1995). En complément, l'état sanitaire des houppiers par observation visuelle (protocole DSF) est régulièrement noté sur certains dispositifs.
- Inventaires en plein des peuplements : croissance radiale (C130), parfois hauteur.
- Inventaires des espèces pour les strates arborée, arbustive, herbacée et muscinale. L'inventaire est réalisé en abondance-dominance suivant la méthode de Braun-Blanquet (1932). Les relevés floristiques des essais les plus anciens du réseau ne sont pas toujours disponibles; il n'est alors pas possible de connaître la composition floristique juste avant l'épandage des produits.
- Biomasse-minéralomasse des peuplements : de façon plus sporadique, des campagnes de mesure de biomasse-minéralomasse sur arbres entiers ont été conduites sur certains dispositifs. Cette approche permet de connaître la répartition des éléments (N, S, P, K, Ca, Mg...) dans différents compartiments anatomiques (tronc, branche...) et commerciaux (diam > 4 cm, diam > 7 cm...) à l'échelle d'un peuplement. La variation des stocks entre deux dates permet également d'évaluer le prélèvement net par les arbres (immobilisation nette annuelle dans la biomasse aérienne).

Glossaire (mots marqués d'un « * »)

Approche isotopique : utilisation d'un isotope particulier comme traceur pour comprendre le cheminement d'un élément dans un système, en l'occurrence ici l'écosystème forestier

Cations échangeables: cations retenus sur le complexe adsorbant (formé notamment par certaines argiles et/ou la matière organique du sol) dont ils compensent la charge négative et susceptibles d'être remplacés charge pour charge par d'autres cations provenant de la solution du sol. Les principaux cations échangeables sont: Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺ et H⁺.

Cycles biogéochimiques: succession de transferts d'un élément ou d'une substance chimique au sein d'un écosystème, impliquant particulièrement les différents horizons des sols et les plantes. On peut s'intéresser aux cycles du carbone, de l'azote, du calcium, etc.

Dendrochimie : analyses chimiques des cernes de bois, permettant notamment de mieux comprendre l'histoire d'un peuplement et de sa croissance

Isotope : chaque élément chimique a plusieurs isotopes, possédant le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons dans le noyau; les propriétés chimiques des isotopes d'un même élément sont presque identiques.

Traceur : substance, naturellement présente dans le milieu ou artificiellement introduite, permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve

Certaines placettes ont également été fortement instrumentées pour devenir des sites ateliers (Potées, Breuil-Chenue, Fougères) dont l'objectif principal est d'étudier la circulation des éléments, les cycles biogéochimiques* à l'échelle de l'écosystème. Des collecteurs d'eau (lysimètres) sont alors installés à différents niveaux de l'écosystème (audessus du couvert, sous le couvert, à différentes profondeur dans le sol), ainsi que des capteurs (humidité, température...) et d'autres types de collecteurs (bacs à litière....), afin d'évaluer les flux d'éléments entrant, circulant dans l'écosystème forestier et en sortant, au pas de temps mensuel pendant plusieurs années. Les suivis classiquement réalisés sur les dispositifs du réseau (sol, humus, foliaire, croissance) a minima tous les 10 ans ne donnent qu'une image très partielle du fonctionnement de l'écosystème ; l'étude des flux à une échelle de temps fine permet de comprendre en détail ce fonctionnement.

Les différents échantillons solides collectés sur ce réseau ont pour la plupart été référencés et conservés par l'unité BEF. Les bases de données regroupant l'ensemble des données disponibles sur ce réseau sont en cours d'élaboration. Les sites en mauvais état ou détruits (tableau 2) sont également intégrés à ce travail de sauvegarde des données et des échantillons.

Limites du réseau Amendement

De par la dispersion géographique des sites et leur historique éparpillé, les paramètres climatiques et édaphiques, les essences et, pour une même essence, l'âge des peuplements peuvent varier d'un site à l'autre. De plus, les traitements appliqués (produits et doses) ne sont pas toujours les mêmes. Enfin, la date des mesures et l'intervalle temporel entre deux campagnes diffèrent aussi bien souvent. Toutefois, les paramètres et les méthodes de suivis sont similaires entre sites, ce qui constitue un atout majeur pour le réseau.

Rappel des principaux effets de l'amendement

Les dispositifs existants ont d'ores et déjà permis de répondre à de nombreuses questions concernant la pratique de la fertilisation. Les résultats concernant l'apport de fertilisants N, P et K ne seront pas développés dans cet article et l'ouvrage de M. Bonneau peut être consulté à ce sujet (Bonneau, 1995). Nous nous focaliserons ici sur la pratique de l'amendement en forêt, sur sols forestiers acides, le réseau ayant très majoritairement servi ce propos depuis les années 1980. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux effets de l'amendement raisonné (adéquation entre les besoins et les apports), observés sur des placettes amendées en comparaison de placettes témoins. Certains dispositifs du réseau permettent d'étudier l'effet « dose » avec des apports plus élevés en certains éléments (qui peuvent entrainer des modifications plus drastiques de l'écosystème), mais ce n'est pas l'objet de cette présentation.

Les conclusions ci-après sont un résumé succinct des connaissances actuelles. La poursuite des recherches permettra entre autres de conforter ou d'affiner ces conclusions sur des échelles de temps plus longues (> 40 ans).

Acidité des sols et réserves disponibles

L'acidité des sols réduit le fonctionnement biologique avec notamment une forte diminution voire la disparition des populations de vers de terre, qui se traduit entre autres par des humus épais. Dans les quelques années qui suivent l'amendement, l'épaisseur des humus diminue progressivement et leur pH augmente. Ce processus s'accompagne très souvent d'une augmentation de la biomasse de vers de terre dans les sols amendés, celle-ci étant facilitée si ces populations étaient présentes avant l'apport. Ces observations témoignent d'une amélioration nette du recyclage des matières organiques (et des nutriments associés) dans l'écosystème. Ces effets peuvent perdurer plusieurs décennies et contribuent grandement à l'amélioration de l'alimentation minérale du peuplement.

Quelques années après l'apport d'amendement, on voit aussi le pH (plus le pH est faible, plus le sol est acide) et le taux de saturation S/T (plus le S/T est élevé, plus le « gardemanger » est rempli) augmenter dans les premiers horizons du sol (0-10cm). L'augmentation du pH du sol et du S/T, donc la réduction de l'acidité, se propage ensuite progressivement dans le profil de sol, depuis la surface vers la profondeur. Cette étape peut prendre plusieurs décennies et contribue durablement à la restauration de l'écosystème. L'intensité du processus de réduction de l'acidité du sol ainsi que son étalement temporel dépendent de plusieurs facteurs (type d'amendement, type de sol, essences en présence...).

Les stocks de Ca et Mg échangeables* augmentent progressivement dans les sols dans les années qui suivent un amendement calco-magnésien et ces éléments se maintiennent dans le système sol-plante pendant plusieurs décennies. Ceci tient au fait que les cycles biogéochimiques* sont très conservatifs et les éléments sont activement recyclés par la végétation, ce qui limite les déperditions. Il faut toutefois veiller à bien raisonner l'apport (quels éléments et quelles doses) pour ne pas engendrer sur le moyen ou long terme une carence en un élément qui n'était pas limitant pour la croissance des arbres avant l'apport. Un exemple bien connu est celui du potassium (K), qui peut devenir limitant dans un écosystème amendé avec de la dolomie seule (Ca-MqCO₃).

Pour plus d'informations, voir les travaux de Renaud *et al.* (2009a), Toutain *et al.* (1988)

Qualité des eaux de surface

La qualité chimique des eaux traversant les profils de sols se trouve améliorée par l'apport d'amendements, en relation étroite avec l'amélioration du fonctionnement des sols. Le pH des solutions de sol augmente, ce qui conduit à réduire considérablement la présence d'aluminium soluble, source de toxicité pour les plantes et les autres êtres vivants. Les eaux sont également plus riches en nutriments, notamment ceux apportés par l'amendement (Ca, Mg). Ceci contribue à une disponibilité accrue en nutriment dans les sols, améliorant la nutrition des peuplements forestiers mais aussi à la qualité des eaux quittant le profil de sol (qui approvisionnent les cours d'eau et les réserves souterraines).

Peu de travaux ont été conduits à des échelles spatiales larges, pour évaluer l'impact d'un amendement terrestre sur la qualité chimique et biologique des cours d'eaux. Les seuls dispositifs de ce genre en France sont les bassins versants amendés et témoins de Cornimont et Senones (88, photo 2). La qualité des cours d'eau à l'exutoire des bassins versants est suivie en continu depuis 2002, les amendements avant été réalisés en 2003-2004 en plein par hélicoptère. Les résultats montrent des effets bénéfiques de l'amendement sur la qualité chimique du cours d'eau sur granit (Cornimont) mais ces améliorations ne permettent pas le retour d'une activité biologique importante dans le cours d'eau. Sur grès (Senones), le suivi n'a révélé jusqu'ici aucun effet de l'amendement sur la qualité des eaux des ruisseaux; l'hypothèse la plus probable est que le temps de transfert de l'eau et des éléments minéraux jusqu'aux ruisseaux est de plusieurs décennies pour ce type de substrat géologique. L'effet de l'amendement sur le cours d'eau dépend en partie du cycle de l'eau (chemins empruntés par les eaux alimentant le cours d'eau, temps de résidence...), qui lui-même dépend de paramètres environnementaux comme le climat ou la géologie.

Amélioration de l'état sanitaire des arbres et retour à une production normale

L'état sanitaire global des peuplements s'améliore dans les premières années qui suivent l'amendement. La fréquence des arbres jaunissants est réduite et le pourcentage de défoliation diminue après amendement. Les teneurs foliaires s'approchent progressivement des valeurs optimales, signe que les ressources biodisponibles pour les arbres sont suffisantes. L'amendement permet également un retour à une croissance normale des peuplements (photo 3), lorsque qu'une déficience nutritive et/ou une acidification forte limitait cette croissance.

Pour plus d'informations, voir les travaux de Renaud *et al.* (2009a), Lebourgeois *et al.* (1993), Landmann *et al.* (1987 et 1995).

Effet sur le cortège floristique

La composition du cortège floristique est modifiée par l'apport d'amendement, avec l'apparition d'espèces indicatrices de milieu plus fertile (neutro-nitrophile) sans disparition des espèces acidiphiles présentes initialement. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation modérée du pH dans les premiers horizons de sol, qui

n'est pas suffisante pour provoquer la disparation d'espèces acidiphiles.

Pour plus d'informations, voir l'article de Renaud et al. (2009 b).

Développement d'un outil de diagnostic des besoins en amendement

Le réseau Amendement, couplé à l'étude des cycles biogéochimiques* conduite depuis les années 1980 à l'unité BEF, a permis d'améliorer grandement les connaissances sur la restauration des écosystèmes forestiers par la pratique de l'amendement. Ces connaissances ont été formalisées dans un outil (Regesol) d'aide à l'estimation des besoins en nutriments pour bon nombre d'essences forestières (épicéa, pin, douglas, chêne, hêtre...), dans différentes conditions stationnelles (Legout et al., 2014).

Regesol est un outil informatique de calcul des besoins de correction de la fertilité des sols forestiers basé sur les stocks disponibles, les cycles biogéochimiques et sur les bilans entrées-sorties de nutriments (Ca, Mg, P, K) dans les écosystèmes forestiers. En pratique, le logiciel calcule les besoins nutritionnels des peuplements sur une période donnée,

les compare aux stocks disponibles dans les sols et aux flux d'éléments entrant et sortant de l'écosystème sur cette même période, puis évalue les apports éventuels d'éléments à réaliser pour corriger l'écart. Le logiciel s'appuie entre autres sur les données issues du réseau Amendement. À ce jour, Regesol n'est pas à la disposition du gestionnaire et les expertises de besoins éventuels en amendement, qui s'appuient en partie sur le logiciel, sont réalisées par l'unité BEF. Dans sa version actuelle, l'opérateur doit en effet maitriser les connaissances et concepts sous-jacents à la construction du logiciel, pour l'utiliser et interpréter correctement les sorties. Depuis 2010, environ 35 000 hectares ont été expertisés par l'INRA dont 5000 hectares environ ont été amendés, majoritairement dans les Vosges. Circonscrites au départ au Massif vosgien, les demandes d'expertise s'étendent aujourd'hui à d'autres régions (Massif central, Ardennes, Alsace, Bretagne).

Intérêt du réseau pour les recherches en cours et futures

Malgré l'ampleur des résultats déjà obtenus, de nombreuses interrogations subsistent ou émergent dans le cadre des changements globaux.

Le réseau, à travers les séries de données enregistrées et les échantillons archivés permet des études rétrospectives et la poursuite des suivis. Il constitue ainsi une richesse à préserver pour explorer de nombreuses questions. Par ailleurs, les connaissances acquises et restant à acquérir sur ce réseau permettent et permettront d'alimenter des modèles, très utilisés aujourd'hui pour la recherche (test d'hypothèse, aide à la compréhension, prédiction) mais également comme outils de diagnostic et d'aide à la décision (ex. : Regesol, présenté précédemment). Pour illustrer plus avant l'intérêt du réseau. voici une évocation non exhaustive des projets en cours et à venir.



2- Apport d'amendement par hélicoptère, à la mise en place d'un essai à l'échelle d'un bassin versant (Bassin versant de Cornimont, 2004)

Cycles biogéochimiques* dans les écosystèmes forestiers

Des échantillons des produits apportés sur ces dispositifs, il y a parfois plus de 40 ans, ont été conservés et stockés à BEF; ces produits comportent des traceurs* géochimiques du cycle et de la dynamique des nutriments dans l'écosystème. Les changements induits par la fertilisation dans les cycles biogéochimiques* des nutriments sont très mal connus et le suivi de ces traceurs dans les humus, les sols et les arbres à différentes dates pourra permettre d'avancer sur ces questions.

Une étude récente menée sur le bassin versant de Cornimont (Bolou-Bi et al., 2016) montre également que les variations naturelles des isotopes* stables du Mg permettent de tracer efficacement le devenir du Mg dans le système sol-plante-eaux de surface. Une approche similaire, utilisant les variations naturelles des isotopes du Mg mais aussi du Ca, est en cours sur 6 autres sites du réseau et concerne des hêtraies. Cette approche pourra par la suite être appliquée à l'ensemble des sites du réseau, pour étudier la généricité des mécanismes sur d'autres stations et d'autres essences.

Caractérisation des effets des amendements

Le suivi des dispositifs les plus anciens montre que les effets positifs des amendements (décrits précédemment) sur l'écosystème sont généralement encore visibles 40 ans après les apports; cependant ils peuvent s'estomper progressivement. Il reste donc à préciser la durée de ces effets, leur évolution au cours du temps et à poursuivre la caractérisation des effets en fonction du type de station (climat, type de sol, essence en présence...). L'objectif est d'identifier les variables qui contrôlent l'intensité et la durée des effets de l'amendement, afin de raisonner au mieux les apports lorsau'un déséauilibre nutritionnel est constaté. À l'échelle de la révolution forestière, le coût de l'amendement au regard des bénéfices reste également à définir.

Changement globaux et risques environnementaux associés

Les pressions auxquelles sont exposés les écosystèmes forestiers et qui sont susceptibles de menacer leur durabilité sont aujourd'hui de plusieurs ordres: on peut notamment citer la demande grandissante en bois énergie, la persistance de dépôts atmosphériques azotés élevés, ainsi que les changements climatiques. Le réseau Amendement peut sur certains points aider à comprendre l'effet potentiel de ces changements sur les écosystèmes forestiers et à imaginer les itinéraires de gestion durable.

De nombreux écosystèmes forestiers à faible fertilité minérale, fortement éprouvés dans le passé (surexploitation, fortes charges acides des dépôts atmosphériques soufrés et azotés...), ont une résilience très faible; or une acidification marquée perdure, notamment en raison de dépôts azotés encore élevés et/ou de la diminution des dépôts de cations nutritifs (notamment Ca et Mg).

Les suivis réalisés depuis plusieurs décennies sur les dispositifs du réseau permettent d'alimenter une réflexion sur les mesures de gestion à envisager pour ces écosystèmes, dont l'utilisation d'amendement.

L'étude sur le long terme de la fertilité minérale d'écosystèmes forestiers réalisée dans les dispositifs du réseau Amendement, combinée à des mesures de stocks de nutriments (arbres, humus, sols...), est un outil puissant pour appréhender les disponibilités et potentialités en « bois énergie » des écosystèmes forestiers sans impact négatif sur le milieu, ou pour prévoir si nécessaire un apport de nutriments compensatoire. L'amendement est une pratique curative (restauration des sols dégradés) mais qui peut également être appliquée à des fins préventives pour maintenir (soutenir) la fertilité lorsqu'elle est menacée. En raison des besoins croissants en bois énergie voire en bois matériau (pour la construction, par exemple), la question de l'apport raisonné d'amendements et d'autres fertilisants se posera de plus en plus fréquemment pour les écosystèmes forestiers.



3 - Effet de l'amendement sur la croissance des peuplements (Perche Trappe, 2005) : placettes témoin à gauche et amendée à droite

Enfin, les dispositifs du réseau Amendement constituent des chroniques de long terme incomparables, permettant l'évaluation de l'interaction entre fertilité, climat et accroissement des peuplements. L'usage de la dendrochimie* et d'approche isotopique* notamment, devrait permettre d'identifier et d'évaluer ces interactions, comme par exemple l'impact à long terme d'une sécheresse sur les écosystèmes forestiers, sur leur résilience, en fonction de la fertilité.

En résumé et pour conclure

Dans le domaine de la gestion de la fertilité des sols comme dans bien d'autres, le problème se pose du devenir d'anciens essais expérimentaux qui ont déjà, pour une large part, apporté les réponses aux questions qui ont suscité leur installation. Mais de nouvelles questions surgissent, auxquelles le contexte des changements globaux donne une ampleur inédite qui invite à capitaliser les connaissances pour les prolonger, les analyser sous d'autres perspectives, les confronter à d'autres approches. Les anciens essais y trouvent un regain d'intérêt, individuellement mais aussi et surtout avec la puissance d'un réseau de sites et de données de qualité (anciennes, actuelles et à venir), pérennisé pour faire face à des enjeux essentiels.

> Arnaud LEGOUT Claude NYS Serge DIDIER UR 1138 – BEF

INRA, Centre de Nancy

Claudine RICHTER ONF, département RDI

Bibliographie

Bolou-Bi E., Dambrine E., Angeli N., Pollier B., Nys C., Guerold F., Legout A., 2016. Mg isotope variations to trace liming input to terrestrial ecosystems: a case study in the Vosges mountains. Journal of Environmental Quality, vol. 45(1), pp. 276-284

Bonneau M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Nancy, ENGREF, 367 p.

Braun-Blanquet, 1932. Plant sociology. New York: McGraw Hill. 439 p.

Landmann G., Bonneau M., Adrian M., 1987. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien. Est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? Revue forestière française, vol. 39, pp. 5-11

Landmann G., Bonneau M., 1995. Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains. Springer. 461 p.

Lebourgeois F., Becker M., Bonneau M., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. Revue forestière française, vol. 45, 1993, pp. 639–650

Legout A., Didier S., Nys C., 2014. REGESOL: a diagnostic tool for forest soil improvement by liming. Revue Forestière Française, vol. 66, pp. 632-634

Renaud J.-P., Picard J.-F., Richter C., Legout A., Nys C., 2009 a. Amendements calco-magnésiens et fonctionnement écologique: bilan des expériences conduites dans l'est de la France (massif Vosgien et Ardennes). Revue Forestière Française, vol. 61 pp. 283-300

Renaud J.-P., Picard J.-F., Richter C., Legout A., Nys C., 2009 b. Influence de l'amendement sur la composition et sur la dynamique du cortège floristique pour des peuplements situés sur des sols acides. Revue Forestière Française, vol. 61 pp. 251-266

Toutain F., Diagne A., Le Tacon F. 1988. Possibilités de modification du type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. Revue Forestière Française, vol. 40, pp. 99-107

Dossier



Les groupes de réflexion qui ont présidé, entre autres, aux aspects forestiers de la Loi d'Avenir, puis au Programme National de la Forêt et du Bois, ont fait un constat unanime : la nécessité de faire progresser la recherche forestière dans son ensemble pour mieux répondre aux exigences de la multifonctionnalité, dont en particulier la production de bois, dans un contexte de plus en plus empreint de risques et d'incertitudes. Et aussi la nécessité d'y renforcer la place des sciences économiques, humaines et sociales, ce qui ne va pas sans mal tant les questions foisonnent (par quel bout et avec qui les aborder?). C'est avec les sciences économiques que cette coopération, si débutante soit-elle, est le mieux engagée. Le projet de recherches Écorisques que nous présentons ici en est un exemple, qui concerne de près l'ONF à plusieurs titres, mais dont il n'est guère possible de donner une idée en quelques mots. Nous renvoyons donc le lecteur au bref article introductif de ce dossier, pour poser le décor, avant de prendre connaissance des principaux résultats exposés ensuite en quatre articles, sans prétention d'exhaustivité.

- p. 30 Le projet de recherche Écorisques : de quoi s'agit-il?
- Comprendre les variations des prix du hêtre en France à travers l'analyse rétrospective des ventes de bois en forêts privées et publiques par Hanitra Rakotoarison
- Optimiser la sylviculture en présence de risques et incertitudes?

 Application de la méthode à la hêtraie nord-atlantique

 par Hanitra Rakotoarison et Patrice Loisel
- p. 44 Continuer la sylviculture de pin maritime malgré le risque tempête en Aquitaine? par Jean-Philippe Terreaux et Michel Chavet
- Risque de tempête et viabilité : une approche économique de l'aménagement forestier

 par Jean-Philippe Terreaux et Michel Chavet

Le projet de recherche Écorisques : de quoi s'agit-il?

Le projet Ecorisques a été piloté par le département Recherche, Développement et Innovation de l'ONF. Son intitulé complet : « Optimisation et viabilité de la gestion forestière en présence de risques ». Optimisation et viabilité sont deux types de modélisation économique, qu'on se propose d'utiliser pour aider à la prise de décision en matière de gestion forestière dans un contexte empreint d'aléas. Ambition énorme qu'on limite, dans ce projet exploratoire, aux incertitudes de prix et au risque tempête, en se focalisant sur deux cas d'étude.

Un contexte de risques et incertitudes grandissants

Douze ans se sont écoulés depuis la parution dans *Rendez-Vous techniques* (n° 3) du dossier « Forêts et vents ». On sortait à peine de la période de crise consécutive aux tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999. Depuis, un certain nombre de mesures organisationnelles et de recherches scientifiques ont été mises en place aussi bien en forêt publique que privée en matière de gestion des risques.

Pour ne parler que de l'ONF, il y a d'abord eu l'instruction (INS 03-T-45) sur la gestion de crise, avec le premier guide « Gérer la crise - chablis ». D'autres ont suivi, notamment le « Guide de gestion des forêts en crise sanitaire » (Gauquelin, 2010) dans le cadre du plan d'action sur l'adaptation de la gestion forestière au changement climatique, ou le quide « Gérer la crise feux de forêts en région méditerranéenne » en 2015. Des mesures de prévention (ou adaptation) figurent dans les documents cadres de de la gestion, les directives et orientations nationales et régionales d'aménagement. Enfin les guides de sylviculture, dont l'élaboration intègre notamment les apports de la recherche, portent une attention particulière aux questions de vulnérabilité face aux aléas les plus susceptibles d'affecter tel ou tel contexte biogéographique.

Cependant la gestion forestière doit se faire dans un contexte de plus en plus empreint de risques et d'incertitudes : incertitudes en matière de changement climatique (températures, précipitations, événements extrêmes), de contexte économique (prix du bois, de l'énergie...) et d'exigences sociétales (biodiversité, loisirs...).

Dans le Sud-Ouest par exemple, deux autres tempêtes dévastatrices ont amplifié l'inquiétude des forestiers, publics et privés : Klaus en 2009 et Xynthia en 2010. La tempête Klaus a eu des impacts importants puisqu'elle a touché près de la moitié des forêts de la région Aquitaine, avec des taux de dégâts variant entre 20 % et plus de 60 %, et a mis par terre 40 millions de m³ de bois (IFN actuellement IGN, 2009). Le bilan forestier de Xynthia est moins sévère, de l'ordre de 0,5 millions de m³ de bois renversés en forêt publique, essentiellement dans les Pyrénées (ONF, 2010). Il a d'abord fallu mobiliser des efforts financiers. matériels et logistiques considérables pour exploiter et reconstituer les peuplements. Il a aussi fallu gérer des problèmes sanitaires et de grand gibier, et faire face aux fortes perturbations du marché consécutives aux dommages : une chute immédiate des prix du bois (pin maritime) liée à l'écoulement des chablis, suivie d'une hausse du fait de la baisse de l'offre.

Durant les dix dernières années, le contexte économique de la filière bois a également subi d'autres événements. Le marché du hêtre s'est écroulé, affectant l'ensemble de la filière et en particulier l'ONF, qui gère 52 % des surfaces de hêtraie de production. L'ONF a vu son chiffre d'affaires annuel en hêtre baisser, en euros constants, d'environ 77 millions entre 1999 et 2015 (Source ONF - DCBS). Par ailleurs, et plus globalement, la crise économique de 2008/2009 a fortement diminué les recettes de ventes de bois.

Face à cette complexité, les sciences économiques offrent des moyens d'analyse qui peuvent contribuer à décloisonner les raisonnements et fournir aux gestionnaires une aide à la prise de décision (Peyron, 2014). Mais force est de reconnaître que les travaux en économie des risques sont encore insuffisants face aux multiples aléas en milieu forestier.

Le projet Écorisques et ses objectifs

C'est dans ce contexte que le projet de recherche Écorisques (2013-2015) a vu le jour, avec l'appui financier du Réseau Sciences Économiques et Sociales du GIP Ecofor. Il a été piloté par le département RDI de l'ONF et mené en étroite collaboration avec trois partenaires professionnels et scientifiques (Cabinet Michel Chavet, Irstea et INRA).

Il s'agissait de chercher de nouvelles approches de modélisation économique face à deux types d'aléas majeurs: le risque de tempête et les incertitudes de prix. Ces deux aléas concernent en effet toutes les essences et tous les types de gestion/statuts de propriété. Et ils peuvent avoir, comme on l'a vu, des effets de grande ampleur à l'échelle régionale ou nationale. Plus spécifiquement, le projet vise deux objectifs principaux:

- approfondir l'effet simultané, sur la gestion sylvicole, du risque tempête et des incertitudes sur les variations des prix du bois;
- réfléchir à la mise en place d'outils d'évaluation et de simulation des résultats de la gestion sylvicole dans un contexte aléatoire. Avec un double intérêt : celui de l'aide à la décision pour les opérations de sylviculture et celui de la diversification des patrimoines si on considère la forêt comme un investissement financier parmi d'autres.

Compte tenu du délai imparti, ce projet de recherche a porté sur deux études de cas : le pin maritime du Sud-Ouest et le hêtre dans le Nord de la France. Ce sont deux essences françaises majeures mais dont les systèmes de production sont différents : le premier cas relève pour l'essentiel de la gestion privée, sur une durée de production assez courte (de l'ordre d'une quarantaine d'années), avec un renouvellement par régénération artificielle le plus souvent; à l'inverse le hêtre concerne beaucoup la forêt publique, son cycle sylvicole est plus

long (une centaine d'années) et sa régénération plutôt naturelle.

Approche méthodologique

Le projet a été conduit en deux étapes : d'abord une analyse exploratoire de données d'origines diverses sur les aléas et, ensuite, la conception de modélisations économiques visant à construire un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire. Dans cette deuxième étape, il est important de ne pas s'en tenir à un modèle économique unique mais de varier les approches pour pouvoir explorer ou rendre compte de la complexité inhérente à la production forestière. Complexité du fait de la durée du cycle de production, s'agissant d'un système dynamique exposé à des aléas multiples, de la diversité des situations et de la multiplicité des points de vue et objectifs de gestion. Nous avons donc exploré simultanément des approches d'optimisation et de viabilité appliquées à la gestion forestière.

Analyse des données disponibles sur les risques et les incertitudes

Pour nos études de cas, les données passées concernant les deux types aléas sont analysées avec des méthodes mathématiques fondées sur les statistiques et les probabilités, en faisant une distinction entre risque et incertitude.

Nous utilisons le terme « risque » pour un aléa probabilisable, ce que nous avons pris comme hypothèse pour les tempêtes. Pour les tempêtes dans le pin maritime du massif landais, une recherche approfondie a été menée pour trouver les lois de probabilité et les paramètres adaptés à partir de la littérature sur les événements extrêmes. Ensuite, on a réexaminé la question du lien entre fréquence des tempêtes et changement climatique, ainsi que la fonction de dommage, à la lumière d'une analyse bibliographique portant sur des sources assez diversifiées: rapports du GIEC,

thèses, articles scientifiques, statistiques, etc. Pour le cas des tempêtes sur le hêtre, nous avons pu nous reposer sur des travaux déjà reconnus et publiés dans ce domaine.

Pour les variations des prix du bois, nous employons le terme « incertitude » car il n'est guère possible de définir une loi simple de probabilité. Dans le cadre de ce projet, nous n'en sommes pas restés à cette difficulté mais nous avons cherché, à l'aide de modèles économétriques, à expliquer les variations des prix observés en fonction de multiples facteurs : caractéristiques du bois, les modes de vente, les tendances du marché, les contextes macroéconomiques... Cette analyse économétrique a été faite pour le hêtre, à partir de bases de données sur les ventes passées en forêts privées et publiques. C'est une approche innovante, plus « fine » que l'utilisation habituelle des mercuriales de prix du bois. Pour le prix du pin maritime, nous nous en sommes tenus à l'utilisation classique des mercuriales de l'ONF.

L'approche « optimisation »

La première approche de modélisation économique vise à maximiser la rentabilité économique pour le gestionnaire forestier (public ou privé) et à chercher l'itinéraire sylvicole optimal correspondant, en s'appuyant sur la théorie de base de l'économie forestière (théorie de Faustmann) et sur le modèle de croissance Fagacées pour le hêtre. La prise en compte du contexte aléatoire a été entreprise en testant la sensibilité de l'itinéraire optimal aux différents scénarios de prix et à l'occurrence des tempêtes. Ce travail a abouti au développement de deux outils d'aide à la décision : le premier, appelé Evasylv, fonctionne avec les deux aléas (prix et tempête) mais reste limité à un usage d'expert; le deuxième, installé sur la plateforme Capsis, est un outil générique en libre accès visant à être relié aux différents modèles de croissance disponibles sur cette plateforme. Un

effort particulier a été fait pour mener des simulations sur des scénarios proches de la réalité en termes de prix, de coût des travaux et de taux de dommages potentiels de tempête sur les deux études de cas.

L'approche « viabilité »

La seconde approche de modélisation économique a consisté à explorer plus finement les nouveaux critères économiques de la prise de décision en contexte aléatoire : perte possible, valeur de la forêt dans les situations extrêmes, variance des gains... Nous avons utilisé ensuite la théorie de la viabilité pour déterminer empiriquement l'ensemble des décisions techniques qui permettront à l'avenir de maintenir ces critères dans une plage considérée comme acceptable par le gestionnaire. L'approche de viabilité a été testée sur le cas de l'aménagement d'une forêt de pin maritime aquitain, dont le modèle de croissance est relativement simple.

Quels résultats?

Les deux approches économiques mises en œuvre dans le projet Écorisques sont complémentaires :

- l'une mono-objectif à base d'optimisation, permet de calculer ce que l'on peut espérer comme bénéfice de la sylviculture sur le long terme dans un contexte aléatoire; elle représente un progrès fondamental sur les travaux de Faustmann (qui font abstraction des risques et incertitudes) et présente l'avantage de pouvoir servir à évaluer l'impact économique des décisions sylvicoles à l'échelle de la parcelle;
- l'autre, pluri-objectif, fondée sur la théorie de la viabilité, vise à garder la gestion forestière dans un domaine de viabilité c'est-àdire à conserver différents paramètres (critères) dans un domaine acceptable sur le long terme. Cette deuxième approche pourrait être

plus proche du comportement du gestionnaire en lui permettant d'affiner sa décision à l'échelle de l'aménagement forestier, de mieux appréhender les conséquences des stratégies de gestion ou de limiter les temps de crise en cas de sortie du domaine de viabilité.

Les quatre articles qui suivent illustrent les différents aspects du projet Écorisques et ses principaux résultats pour les deux cas d'étude, sans chercher à couvrir la totalité des travaux qui ont été menés.

Hanitra RAKOTOARISON ONF, département RDI

Jean-Philippe TERREAUX Irstea Bordeaux

Références

IFN (actuellement IGN), 2009. Tempête Klaus du 24 janvier 2009. IF n° 21, 12 p.

ONF, 2010. Tempête Xynthia : des dégâts diffus en forêt. [en ligne]. Disponible sur http://www.onf.fr (consultations : en 2013 puis avril 2016)

Gauquelin, 2010. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire. Paris : Office National des Forêts, Institut pour le Développement Forestier. 100 p.

Peyron J.-L., 2014. Les apports de l'économie aux choix sylvicoles et d'investissements forestiers. Rendezvous techniques de l'ONF n° 45-46 « Quels investissements, pour quelles forêts publiques demain ? », pp. 79-87

Les participants projet Ecorisques :

Chavet Michel, Cabinet Chavet - Experts forestiers, Paris.

Fortin Mathieu, INRA LERFoB (Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois), Champenoux.

UR ETBX

Le Moguedec Gilles, INRA, UMR AMAP (botanique et bio-informatique de l'Architecture des Plantes), Montpellier.

Loisel Patrice, INRA, UMR MISTEA (Mathématiques, Informatique et Statistique pour l'Environnement et l'Agronomie), Montpellier.

Rakotoarison Hanitra, ONF, département RDI (Recherche, Développement, Innovation) à Fontainebleau. Terreaux Jean-Philippe, Irstea, UR ETBX (Environnement, Territoires et infrastructures) Bordeaux – Cestas



in Blumet / C

Comprendre les variations des prix du hêtre en France à travers l'analyse rétrospective des ventes de bois en forêts privées et publiques

La sylviculture du hêtre est une affaire de long terme forcément assez stable malgré les fluctuations de prix observées sur quelque 40 ans et la dégringolade des années 2000, qui engendre pertes de revenus et désarroi. Les facteurs explicatifs de ces variations sont multiples, ce qui ajoute au sentiment d'impuissance. Dans la limite des données disponibles, l'analyse économétrique permet d'isoler et de mesurer l'effet propre de chaque facteur et, ce faisant, de repérer des leviers d'action pour l'avenir. C'est aussi une « brique » élémentaire de modélisations plus complexes.

a production de bois – la vente du bois (pour satisfaire les usages de la société) - est le premier bénéfice tangible de la forêt, au-delà des autres bénéfices (ou services) le plus souvent nonmarchands liés à la biodiversité, à l'accueil du public et autres aménités. Il est donc important pour un gestionnaire et pour un établissement forestier de s'intéresser au prix du bois et à ses variations. Le prix du bois est un facteur déterminant dans le calcul de la rentabilité des itinéraires sylvicoles et influence par conséquent les choix techniques, qui à leur tour conditionnent l'avenir (Peyron, Terreaux, Calvet et Guo, 1998). Cependant, c'est un paramètre extrêmement variable selon la qualité, la grosseur et forme des bois, mais aussi selon les matériels des industriels, la conjoncture... rendant ainsi difficile la décision de coupe ou d'investissement (en coût de régénération et d'entretien) d'un gestionnaire forestier à un instant donné.

Le cas du hêtre illustre bien le problème de la fluctuation des prix car, depuis des années, les gestionnaires

privés comme publics constatent une baisse des prix. Or le hêtre occupe 9 % de la surface totale des forêts en France métropolitaine (Source IGN – Inventaire forestier) ce qui en fait la deuxième essence feuillue la plus fréquente après le chêne (sessile et pédonculé). La baisse du prix de cette essence a donc profondément affecté le secteur forestier, et en particulier l'ONF. En effet, si les ventes de tiges de hêtre représentaient 25 % du chiffre d'affaires national bois de l'établissement en 1999, elles n'y comptent plus que pour 12 % en 2015; cela représente une perte de 77 millions d'euros entre ces deux dates, en euros constants 2015.

Face à ce constat, de nombreuses questions se posent : comment s'explique cette baisse des prix à l'échelle nationale? Y a-t-il des liens avec le contexte économique général? Y-a-t-il à considérer une évolution tendancielle et/ou structurelle des prix du hêtre dans le temps? Toutes les qualités et les classes de diamètre ont-elles été affectées par cette évolution de la même façon? Peut-on faire des prévisions sur le prix des grumes de hêtre pour les

prochaines années? Faut-il continuer à produire des gros bois en forêt?

Issu des travaux de recherche menés dans le cadre du projet Écorisques (2013-2015), cet article a pour objectif de faire la part des choses entre les différentes causes (variables explicatives) des variations à long terme du prix du bois de hêtre. En premier lieu, nous présentons une analyse fine des effets des caractéristiques du bois sur les prix observés dans les ventes en forêts privées et publiques. Cette analyse représente une approche innovante par rapport à l'utilisation habituelle des mercuriales de prix du bois. Puis les variations temporelles du prix du hêtre sont appréhendées avec des données plus agrégées à l'échelle nationale, afin de saisir les effets des variables macroéconomiques. L'ensemble débouche sur des conclusions pratiques qui confortent des actions déjà engagées.

La qualité et le diamètre demeurent importants mais...

Pour analyser les variations du prix du hêtre, nous avons utilisé deux bases de données de prix : celle des cours indicatifs des bois sur pied publiés trimestriellement par le Cabinet Chavet dans la revue La Forêt Privée (Chavet, 1974-2014) puis celle des ventes de l'ONF en Bourgogne - Champagne-Ardenne, grosse région productrice de hêtre ayant une base de données structurée et fournie. On peut considérer que ces deux bases de données peuvent être représentatives du marché du hêtre en France. L'analyse porte uniquement sur les ventes de bois sur pied (BSP) car c'est le mode de vente encore dominant en France. Notons que les « experts » forestiers, respectivement de forêt publique et privée, ont chacun leur propre méthode de constitution des lots de vente et d'estimation des volumes, qualités et prix, ce qui rend difficile une comparaison détaillée des prix. Aussi, dans cet article, les données de la forêt privée et celles de l'ONF ont été analysées séparément.

Ce que disent les données de la forêt privée

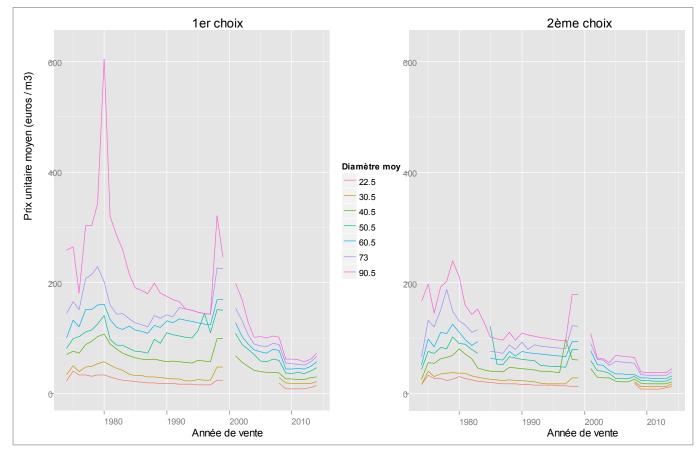
L'analyse est basée sur des données de prix exprimés en euros par m³ constant entre 1974 et 2014. Elles sont détaillées selon 7 classes de grosseur (cf. figure 1) et 2 catégories de qualité liées à l'aspect général de l'arbre sur pied apprécié par le marteleur :

- qualité dite de 1er choix : il s'agit des hêtres présentant une bille sur pied « propre » sur au moins 3,50 à 4 m (qualité escalier) et une belle surbille pouvant constituer, à l'exploitation, ce que l'on appelle une bille allongée. Cette qualité correspond globalement aux classes A, B, AB du classement FCBA que l'ONF utilise pour les bois façonnés.
- qualité dite de 2° choix : ce sont des hêtres sur pied d'aspect standard et moyen, susceptibles de fournir des sciages. Cette qua-

lité correspond globalement aux classes BC, C; les classes CD et D sont dans la partie basse de la fourchette du choix 2.

Les prix suivis par le cabinet Chavet ne tiennent pas compte de la qualité tranchage et du houppier, qui pourraient faire varier sensiblement les données lorsqu'ils sont importants dans un lot de vente.

La figure 1 montre la forte variation, en 40 ans, du cours moyen du hêtre pour l'une et l'autre catégorie de qualité, la qualité de 2° choix étant de loin la plus fréquente selon Michel Chavet. Un premier pic a eu lieu vers 1979 en raison d'une augmentation de la demande induite par le 2° choc pétrolier mondial (guerre Iran-Irak) et liée à la mise en ménage des baby-boomers : construction en hausse, forte demande en bois massif pour l'aménagement des foyers (Généré, 2014).



Source des données : Cabinet Chavet (1974-2014)

Fig. 1 : évolution des prix du hêtre de 1974 à 2014 (en euros constants) dans les deux catégories de qualité en forêt privée

Un second pic est observé après 1995 et jusqu'en 1999, en raison d'une forte demande des pays asiatiques (Marquette et Rubio, 2005), principalement pour fabriquer des meubles réexportés ensuite en Occident. Les bouleversements causés par les tempêtes Lothar et Martin expliquent les données manquantes en 2000. Quelques données sur les petits diamètres sont également indisponibles durant la période de 2001-2008.

Après ce premier constat, nous avons testé sur ces données différents modèles économétriques de régression multiple provenant d'une revue de la littérature scientifique en matière d'économie du bois, afin d'expliquer les sources de variation de prix. Nous avons retenu les modèles les plus significatifs, c'està-dire les formes fonctionnelles qui reproduisent les données réelles avec le moins d'erreur, et nous avons cherché à les améliorer en introduisant des variables correspondant aux caractéristiques descriptives de nos données. Pour les prix en forêts privées, cette démarche conduit à retenir deux types de modèles (voir encadré) : un modèle simple (modèle 1), qui ne tient pas compte des interactions possibles entre les variables explicatives mais permet de dégrossir l'explication possible des sources des variations, et un modèle avec interactions (modèle 2), meilleur que le précédent mais plus complexe à interpréter.

Les spécifications des modèles économétriques utilisés dans cette étude

L'objectif de la régression multiple est ici d'expliquer les variations du prix du hêtre, noté p_0 , qui correspond au prix moyen de vente BSP (en \in /m³) avec différentes variables explicatives disponibles dans les bases de données (diamètre moyen, qualité, année de vente…). Les 4 modèles utilisés dans l'étude sont présentés ici :

Pour les données de la forêt privée

Modèle 1 sans interaction

$$p_0 = aD_g + bQ + cT + dE + e + \varepsilon$$

Dg est le diamètre moyen (cm), Q est une variable qualitative correspondant à la qualité du bois (codée ici 0 pour le 1^{er} choix et 1 pour le 2^{e} choix); T est l'année de vente (1974-2014) et E est une variable qualitative désignant la conjoncture économique (codée 0 avant l'année 1999 et 1 après; elle rend compte d'un changement structurel entre les périodes avant/après cette date).

Modèle 2 avec interaction

$$p_0 = aD_{g} + bQ + cT + dE + eD_{g} \cdot Q + fQ \cdot E + gT \cdot E + hD_{g} \cdot T + iD_{g} \cdot E + j + \varepsilon$$

Les notations sont identiques au modèle 1 mais il y a en plus les interactions entre les variables explicatives.

Pour les données de la forêt publique

Modèle 3 avec les modes de vente et les localisations géographiques

$$p_0 = aD_g + dD_g^2 + cT + dD_g.T + eM + fA + g + \varepsilon$$

 $D_{\rm g}^{\ 2}$ est le carré du diamètre moyen, M est une variable qualitative liée aux modes de ventes (codée 0 pour les ventes de gré à gré, dont les contrats d'approvisionnement), et 1 pour les ventes publiques) et A est une variable qualitative liée à la localisation géographique (ici les agences).

Modèle 4 avec l'offre et la demande

$$\ln p_0(t) = a \ln p_0(t-1) + b \ln O(t) + c \ln D(t) + d + \varepsilon$$

 $p_0(t)$ est le prix moyen du hêtre sur pied (\in /m³) de l'année en cours, p_0 (t-1) est le prix moyen de l'année précédente, O(t) est l'offre de l'année en cours (représentée par la récolte française de bois d'œuvre de hêtre, en volume) et D(t) est la demande de l'année en cours (représentée par le volume de sciages de hêtres produits en France).

NB: Pour les 4 modèles, les lettres en minuscule a, b, c, d.... g correspondent aux coefficients obtenus pour chaque variable explicative avec le logiciel R – version 3.1.2. E est l'erreur du modèle qui suit une loi normale de moyenne égale à 0.



halie Petrel / ON

connaissances

	Modèle 1 sar	s interaction	Modèle 2 avec interaction	
Variables explicatives	Valeur du coefficient*	Écart type du coefficient	Valeur du coefficient*	Écart type du coefficient
Constante	1 960,68	247,41	- 531,30	472,10
Diamètre (Dg)	1,68	0,04	52,77	9,14
Qualité (Q)	- 24,10	1,58	10,45	3,11
Année de vente (T)	- 0,99	0,12	0,25 NS	0,24
Conjoncture économique (E)	- 15,44	3,15	3662,00	597,30
Interaction entre qualité (Q) et diamètre (Dg)	-		- 0,74	0,06
Interaction entre Qualité (Q) et conjoncture économique (E)	-		7,85	2,48
Interaction entre année de vente (T) et conjoncture économique (E)	-		- 1,82	0,30
Interaction entre année de vente (T) et diamètre (Dg)	-		- 0,03	0,00
Interaction entre diamètre (Dg) et conjoncture économique (E)	-		- 0,45	0,12
R² ajusté**	0,:	84	0,	92

^{*}Tous les coefficients sont significatifs avec une probabilité d'erreur quasi-nulle sauf l'année de vente dans le modèle 2

Tab. 1 : coefficients des modèles de prix 1 et 2 ajustés sur la base de données du Cabinet Chavet

Les modèles obtenus après ajustement statistique des coefficients sur les données présentent un pouvoir explicatif élevé, c'est-à-dire qu'ils reflètent bien les variations de prix observées. Les valeurs des coefficients (tableau 1) montrent que, sur les 40 dernières années le diamètre et la qualité ont un effet positif sur le prix. Le modèle 1 suggère que si le diamètre moyen augmente de 1 cm; alors le prix augmente en moyenne de 1,68 euros/m³. L'écart de prix (décote) entre la qualité de 1er choix et de 2^e choix est en moyenne de 24,1 euros/m³. Toutefois cet ajustement ne tient pas compte des volumes effectivement vendus par classe de diamètre (indisponibles dans la base de données). Il y a sans doute beaucoup moins de ventes de très gros bois que de bois moyens et l'effet (positif) du diamètre s'en trouve surestimé dans cette catégorie.

Par ailleurs, ce même modèle montre qu'il y a : i) une baisse tendancielle des prix de l'ordre de 1 euro/m³ par an en moyenne (indépendamment des effets des autres variables) et ii) une chute d'environ 15 euros/m³ liée à un changement structurel de la conjoncture économique après 1999 comparée à la période 1974-1998.

Le modèle 2 suggère néanmoins que ces évolutions sont un peu plus complexes car il y a bien des interactions entre les variables explicatives (les coefficients correspondant aux termes qui combinent deux variables ont des valeurs non négligeables; tableau 1). Les baisses (coefficients négatifs) les plus importantes portent sur les gros bois de 2e choix, en particulier dans le contexte économique récent.

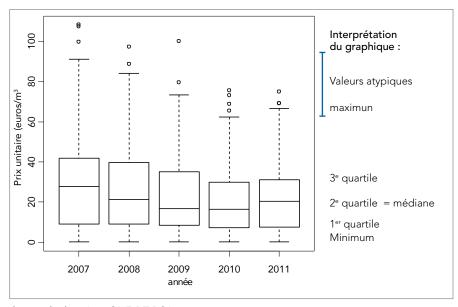
Ce que disent les données de la forêt publique

Les données analysées proviennent de la direction territoriale de Bourgogne – Champagne-Ardenne (DT BCA) à partir d'une extraction de la base de données « coupe ». Cette base contient les données d'environ 12000 lots vendus entre 2007 et 2011, constituant malgré la période limitée une mine d'information précieuse

car les données de diamètre ne sont pas agrégées par classes comme celles du Cabinet Chavet ou dans le D 1-8 de l'ONF (État de reporting des bois en volume et en valeur, par essence et catégorie de diamètre). Nous avons considéré uniquement les lots de vente en BSP où le hêtre représente à lui seul plus de 90 % du lot (en volume). Ensuite, nous avons exclu les lots aberrants afin de limiter l'influence des erreurs de saisie. Nous avons aussi exclu des ventes considérées comme exceptionnelles ou des lots cédés gratuitement aux communes sous forme d'affouage. La base de données finale utilisée pour mener les analyses statistiques comporte 1295 lots.

La figure 2 montre que le prix moyen du hêtre a diminué de 2007 à 2009 puis semble stagner mais la proportion du hêtre de valeur (+ de 40 euros/m³) a continué à chuter. Cette figure présente ainsi des tendances temporelles similaires à celles observées avec les données du Cabinet Chavet sur la même période.

^{**} R ² ajusté appelé également « coefficient de détermination » est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Plus sa valeur se rapproche de 1, mieux le modèle reproduit les données observées.



Source de données : ONF, DT BCA

Fig. 2 : évolution des prix du hêtre en forêt publique de 2007 à 2011

Variables explicatives	Valeur du coefficient	Écart type du coefficient	Degré significativité
Constante	15,20	3,73	***
Diamètre (<i>Dg</i>)	0,22	0,17	
Diamètre (<i>Dg</i> ²)	3,9 10 ⁻³	0,00	
Année de vente (T)	1,29	0,73	
Mode de vente (M) : publique	-4,56	1,22	***
Agence Aube Marne (8210)	-4,57	2,70	
Agence Haute Marne (8215)	-4,31	1,67	*
Agence Bourgogne Ouest (8250)	-5,46	1,74	**
Agence Bourgogne Est (8255)	-7,51	1,68	***
Agence Ardennes (8205)	0	-	-
Interaction entre année de vente (T) et diamètre (Dg)	-0,07	0,02	***

R² ajusté : 0,60

Probabilité d'erreur selon les codes de degré de significativité : $***=0; **=0,001; *=0,01; '\cdot'=0,05$

Tab. 2 : coefficients du modèle 3 ajustés sur la base de données de l'ONF (DT BCA)

Le modèle de régression multiple le plus significatif que nous avons trouvé pour ces données est le modèle 3 (voir encadré) avec un pouvoir explicatif relativement élevé. Les valeurs des coefficients du modèle ajusté sont données dans le (tableau 2). On voit là encore que globalement les prix augmentent avec le diamètre, ou plutôt le carré du diamètre, mais avec une valeur de coefficient très faible qui traduit le fait que, dans cette période récente, les différences de prix entre classes de diamètre se sont beaucoup tassées. On voit aussi qu'il y a une interaction (négative) significative entre le diamètre et l'année de vente. Ce sont les prix des gros bois qui ont particulièrement diminué dans le temps confirmant ainsi les constats dans la base de données Chavet.

Par ailleurs, il y a des différences de prix assez importantes selon la localisation géographique (agences).

Par construction, le coefficient correspondant à chaque agence (tableau 2) compare la moyenne des prix de cette agence à celle d'une agence prise aléatoirement comme référence, et qui se trouve être celle des Ardennes (dont le coefficient est donc nul). Toutes choses égales par ailleurs, c'est l'agence des Ardennes qui arrive à obtenir les prix les plus élevés sur le hêtre. Sachant que les forêts feuillues y sont assez rares, il s'agirait ici d'un effet de rareté du produit dans un contexte de forte demande en Belgique voisine (en ébénisterie et menuiserie notamment). Les prix sont significativement plus faibles en Bourgogne (Ouest et Est). Les résultats montrent également que les prix du hêtre issus des ventes de gré à gré, y compris celles en contrat d'approvisionnement, sont plus élevés que ceux des ventes publiques.

Peut-on prévoir l'évolution future des prix du marché?

Les résultats précédents montrent que, malgré l'effet des caractéristiques du bois (grosseur, qualité), les prix du hêtre sont surtout liés à la conjoncture économique, à l'année de vente. Or les gestionnaires ont besoin d'une certaine visibilité sur le marché futur. Pour tenter de répondre à cette attente, nous sommes passés à l'échelle macroéconomique en conduisant une analyse macroéconomique des variations du prix selon la démarche utilisée aux États-Unis par Luppold (1982).

Cet auteur considère, conformément à la théorie économique, que le prix est le résultat d'une relation d'équilibre entre l'offre et la demande mais aussi que cette relation est dynamique dans le temps. C'est l'hypothèse du modèle 4 (voir encadré) qui, contrairement aux précédents, fonctionne sur les variations (en %) et non en valeurs directes, et n'a donc pas une forme linéaire mais loglinéaire. Ce modèle a été ajusté sur le prix de vente moyen du hêtre (tous diamètres confondus) constaté année après année par l'ONF à l'échelle nationale, sur la période 1966-2011. Les coefficients donnent directement l'effet des variations (en %) de chaque variable explicative sur la variation du prix du hêtre, ces variables explicatives étant le prix moyen observé l'année précédente, ainsi que l'offre et la demande. Nous avons considéré que l'offre est ici le volume de récolte de bois d'œuvre et que la demande correspond au volume de sciage du hêtre produit en France (Agreste 2010 et 2014).

Les coefficients du modèle ajusté (tableau 3) montrent que la variation des prix du hêtre est liée positivement à la demande des industriels du sciage et au prix de l'année précédente. Si la demande en termes de volume de sciage augmente de 1 % alors le prix du hêtre augmente de 1,09 %. L'offre a un effet négatif sur le prix : si le volume total de bois

Variables explicatives	Valeur du coefficient	Écart type du coefficient	Degré significativité
Constante	- 0,09	0,98	NS
Log du prix de l'année précédente (P(t 1))	0,41	0,13	***
Log du Volume du Bois d'œuvre de l'année en cours (O(t))	- 0,60	0,27	**
Log du Volume du sciage de l'année en cours (D(t))	1,09	0,26	***
R² ajusté : 0,7	1		

Probabilité d'erreur selon les codes de degré de significativité : « *** » = 0; '**' = 0,001 Tab. 3 : coefficients estimés du modèle 4 à l'échelle nationale

d'œuvre récolté à l'échelle nationale augmente de 1 %, le prix du hêtre va diminuer de 0,6 %. Noter que nous avons testé d'autres facteurs macroéconomiques susceptibles d'intervenir dans cette relation : les variables telles que la surface des forêts, le PIB, le taux de crédit et le salaire dans l'industrie du bois n'ont pas d'effet significatif sur les prix du hêtre. En valeur absolue, c'est surtout le coefficient lié à la demande des scieries qui a la valeur la plus élevée; autrement dit, c'est la demande qui pèse le plus sur les variations des prix. Ce dernier modèle ne permet cependant de faire que des projections à court terme.

Conclusions

Les prix du bois sont déterminants pour les gestionnaires forestiers mais ils sont sujets à de fortes fluctuations. Dans cet article, nous avons approfondi les facteurs de variation des prix du hêtre à différentes échelles avec des données peu ou pas exploitées jusqu'ici (longue durée des données Chavet, données ONF au « grain » des lots de vente puis à l'échelle nationale). Ces analyses ont permis de construire des modèles économétriques, qui malgré des écarts inévitables, semblent donner des résultats convergents et sont assez performants sur ces données rétrospectives. Il en ressort que le diamètre et la qualité restent, avec le mode de vente, les principales variables à la disposition du producteur pour

influer positivement sur le prix du bois. Néanmoins, ils sont tributaires de la conjoncture économique difficile du hêtre: perte des débouchés de valeur (ameublement, menuiserie fine), ralentissement de la production des sciages, demande volatile à l'export... Cette conjoncture a produit deux effets très négatifs: une tendance générale baissière du prix du hêtre et un décrochement lié au changement structurel brutal du marché survenu après 1999. Ce qui perturbe les repères et pose des questions pour l'avenir.

Les résultats présentés ici comportent deux types de limites. Premièrement, les modèles ne sont valables que dans leurs conditions d'observation. La forme des modèles et les coefficients de chaque variable explicative dépendent fortement de l'information disponible dans les bases de données. Ainsi par exemple, les remarquables données publiées depuis 40 ans par le Cabinet Chavet ne permettent pas, faute notamment d'information sur les volumes concernés par classe de diamètre, de « pondérer » l'effet du diamètre sur le prix (même chose pour la qualité). Pour la forêt publique, l'extraction minutieuse de l'information à une échelle très fine, n'a pu être menée que sur quelques années récentes et pour le seul territoire de Bourgogne - Champagne-Ardenne. Les tendances de long terme et la possibilité de transposer à d'autres régions restent donc à démontrer. Deuxièmement, s'agissant de prix de bois sur pied, on ne dispose pas d'information précise sur la qualité du bois, les conditions d'exploitation (pente, éloignement des axes routiers, contraintes diverses...), l'usage du bois (exportation, ameublement, bois énergie...) ou les industries de transformation (matériels disponibles, taille des entreprises...). De sorte que l'approche reste trop globale pour appréhender la diversité des situations auxquelles sont confrontés les sylviculteurs et ne permet quère de se projeter sur le long terme. Il faudra pour cela approfondir les travaux de recherche sur la modélisation des prix, en incluant l'ensemble de la filière.

Malgré ces limites, nos résultats conduisent, pour revaloriser le hêtre dans le futur, aux quelques pistes que voici.

- Maintenir les industries de sciage de feuillus par un appui à l'innovation (process et produits). Un certain renouveau des usages du hêtre est encouragé (Généré et Richter, 2013). Ainsi, des recherches du FCBA viennent d'aboutir sur la qualification du hêtre en structure et la caractérisation des bois chauffés à haute température pour des usages en bardage et en platelage. Par ailleurs, des panneaux croisés (CLT) en hêtre sont désormais créés par une entreprise privée pour des immeubles jusqu'à 8 étages
- Promouvoir la vente du hêtre par contrat d'approvisionnement. Les avantages sont importants aussi bien pour les gestionnaires forestiers que pour les scieurs en terme de sécurisation respectivement des ventes et des approvisionnements, de stabilité des prix, d'adéquation des produits livrés au besoin spécifique des industries en terme de qualité et d'une meilleure précision des volumes. Notons que pour les gros bois du hêtre, les efforts de contractualisation sont déjà engagés et les ventes en bois façonné développées à cet effet

représentent actuellement plus de la moitié des ventes domaniales de hêtre.

 Poursuivre la production de hêtre de qualité puisque, même dans une conjoncture difficile, les prix de vente restent plus élevés pour le « premier choix » (on ne parle pas ici de lots d'exception) que pour le « deuxième choix ».

Cette dernière recommandation doit cependant s'inscrire dans une analyse globale de la rentabilité des itinéraires de production, incluant les coûts de la sylviculture et prenant en compte des risques climatiques et biologiques. C'est justement l'objet de l'article suivant.

Hanitra RAKOTOARISON

ONF, département RDI

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier le GIP Ecofor pour son soutien, en particulier financier, la Direction Bois de la DT Bourgogne – Champagne-Ardenne pour la fourniture des données et Michel Chavet pour son appui dans l'interprétation des résultats.

Bibliographie

Chavet M. et P., 1974-2014. Cours des bois sur pied. La forêt privée, pp. 48-49

Généré B., 2014. L'évolution des prix du bois d'œuvre depuis 1871. ONF. Les dossiers forestiers n° 26 (actes du 2° colloque Histrafor 2013), pp. 97-105

Généré B., Richter A., 2013. Le Renouveau du hêtre. CNRS-IHMC, Cahiers d'études n° 23 (Actes du colloque GHFF 2012, Corvol A.), pp. 66-74

Luppold W., 1982. An econometric model of the hardwood lumber market. Research Paper USDA Forest service, NE-512, 19 p.

Peyron J.-L., Terreaux J.-P., Calvet P., Guo B., 1998. Principaux critères économiques de gestion des forêts : analyse critique et comparative. Annales des Sciences Forestières, vol. 55 n° 5, pp. 523-551

Rubio M. et Marquette E., 2007. Panorama du marché du hêtre (2006). Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises », pp. 9-13



Pichard, ONF

Optimiser la sylviculture en présence de risques et incertitudes? Application de la méthode à la hêtraie nord-atlantique

La gestion forestière peut être considérée comme un investissement auquel le concept de l'optimisation économique est applicable. La longueur des cycles de production forestière et l'arrivée d'événements inattendus conduit cependant le gestionnaire à prendre des décisions différentes de celles qui ont été définies comme optimales au moment de la mise en place du peuplement forestier. Cet article explore les effets de l'incertitude en matière de prix et de risque tempête sur le cas de la hêtraie.

n 1849, un ingénieur allemand nommé Faustmann propose, pour estimer en bloc la valeur d'un fonds forestier (foncier + peuplement), un critère économique appelé Bénéfice Actualisé à Séquence Infinie (BASI)₁. C'est aussi l'un des plus adaptés pour évaluer la rentabilité économique de la sylviculture sur du long terme (Peyron et al., 1998) mais il repose implicitement sur des hypothèses d'absence de risques et d'incertitudes sur les paramètres forestiers et économiques.

Or, la longueur des cycles de production forestière, qui va jusqu'à un siècle pour le hêtre (et jusqu'à deux siècles pour le chêne), est fortement empreinte de risques et d'incertitudes d'origines diverses. Les incertitudes peuvent être d'ordre économique comme l'évolution globale des prix du bois, l'évolution spécifique des prix de certaines catégories ou essences, la hausse des coûts de l'énergie... ou bien d'ordre climatique (gel, tempêtes...), biophysique (incendies) ou encore biotique (pathologies diverses, prolifération d'insectes xylophages).

Comment aider le gestionnaire forestier à optimiser la sylviculture dans un contexte aussi aléatoire? C'est une question très large, matière à bien des travaux et réflexions auxquels le projet Écorisques a essayé de contribuer. Nous avons choisi d'étudier les effets individuels puis simultanés des variations de prix du bois, d'une part, et des tempêtes, d'autre part, sur la gestion forestière. Nous exposons d'abord la démarche d'optimisation de la sylviculture et sa mise en œuvre à l'aide d'un outil de simulation. Puis nous indiquons comment la méthode peut être appliquée au cas de la hêtraie nord-atlantique, les résultats qui en ressortent et les conclusions qu'on peut en tirer.

Evasylv, un outil de simulation pour aider à optimiser la sylviculture en contexte aléatoire

L'optimisation est un domaine d'application de la recherche opérationnelle. Cela consiste à chercher les meilleures décisions sur un ensemble de scénarios possibles pour un système de production afin d'obtenir le résultat le plus performant, et en respectant les contraintes de production.

S'agissant de sylviculture, la méthode d'optimisation adoptée dans le projet Écorisques utilise comme indicateur de « performance » le critère de Faustmann (1849), mais en tenant compte des variations du prix du bois et du risque de tempête. L'échelle de l'analyse est celle de la parcelle, qui est celle des décisions de coupes. Le problème d'optimisation traité ici est de trouver l'intensité des coupes et les dates d'éclaircie et de coupe finale (c'est-à-dire la durée de révolution), qui maximisent le BASI d'un peuplement dans ce contexte d'incertitude. Les « contraintes » correspondent aux conditions d'une sylviculture réaliste.

Pour pouvoir explorer un grand nombre d'itinéraires sylvicoles possibles, l'UMR MISTEA-INRA de Montpellier a développé un logiciel de simulation appelé Evasylv dont l'architecture est présentée dans la figure 1. Au démarrage, l'utilisateur doit renseigner les paramètres qui conditionnent la sylviculture (modèle de croissance, état initial du peuplement, itinéraire sylvicole de référence, modèle de risque, fonction de dommage...), les paramètres économiques (prix du bois, coûts

¹ Valeur du fonds ou BASI est la différence entre les flux de recettes liées à la vente de bois et les flux de dépenses faites par le gestionnaire (coûts des travaux sylvicoles et coût de gestion) sur une infinité de révolutions. Ce calcul fait appel à l'utilisation d'un taux d'actualisation pour ramener les différents flux à la date initiale.

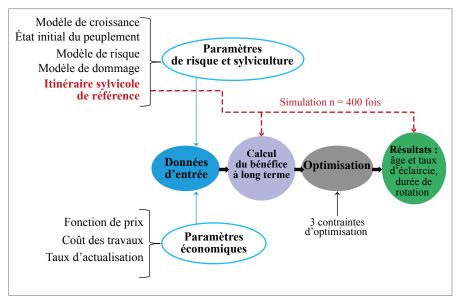


Fig. 1: architecture du logiciel Evasylv

des travaux et taux d'actualisation), ainsi que les contraintes sylvicoles de l'optimisation. Puis l'outil va dans un premier temps agréger ces informations pour calculer la hauteur et le diamètre des arbres, leur accroissement, les volumes de bois sur la durée totale de révolution ainsi que le BASI. Ensuite, il va générer automatiquement une large gamme d'itinéraires sylvicoles (environ 400) en modifiant successivement les dates et les taux de prélèvement de chaque éclaircie, dans la limite des contraintes, pour voir s'il est possible d'améliorer le BASI initial. Les sorties sont une description du meilleur itinéraire ainsi que le BASI correspondant.

Étude de cas sur la hêtraie Nord-Atlantique

Cette partie de l'article expose l'application de l'optimisation à la sylviculture de la hêtraie Nord-Atlantique avec l'outil Evasylv.

Fagacées, un modèle de croissance du peuplement

Le modèle de croissance est au cœur de l'optimisation. En effet, contrairement à une industrie manufacturière, la production de bois dépend du lien étroit entre :

- la croissance naturelle du peuplement, selon les caractéristiques de la station (sol, climat, fertilité) qui affectent à la fois la hauteur, la surface terrière et le volume;
- et l'action du sylviculteur qui va décider de la densité, de l'éclairement, de la qualité des arbres à conserver, de la date des coupes, etc.

Nous utilisons ici le modèle de croissance appelé Fagacées, dans la version publiée par Le Moquédec et Dhôte (2012) pour des futaies de Chêne sessile ou de Hêtre en peuplements purs et équiennes. Il s'agit d'un modèle de type « arbre indépendant des distances » qui permet de suivre l'évolution individuelle de chaque tige d'un peuplement forestier simulé (à partir d'un état initial donné à 15 ans). L'outil Evasylv n'utilise que les valeurs dendrométriques moyennes données par Fagacées à l'échelle d'un peuplement. Il n'est pas possible de donner des consignes pour un arbre particulier.

État initial du peuplement, itinéraire de référence

Le modèle de croissance est initialisé, d'après les indications du guide des sylvicultures de la hêtraie Nord-Atlantique (Pilard-Landeau et Simon, 2008), avec un peuplement de 15 ans issu de régénération naturelle, en fertilité moyenne (Ho = 32 m à 100 ans), et qui après dépressage se retrouvera à une densité d'environ 2900 tiges/ha vers 33 ans, âge d'entrée dans la phase d'éclaircies de l'itinéraire de référence.

Modèle de risque d'événement extrême

Pendant la durée de révolution, le peuplement peut être exposé à une ou plusieurs tempêtes, même si c'est très aléatoire. Pour simuler ce type d'aléa, nous utilisons une loi de probabilité usuelle, la loi de Poisson, qui décrit la probabilité qu'un événement rare de fréquence moyenne connue se produise durant un intervalle de temps donné. Cette loi peut donc s'appliquer à la fréquence des événements climatiques extrêmes, comme une tempête de l'ampleur de celle qui a eu lieu en 1999 et dont nous avons considéré qu'elle a une fréquence centennale, c'est-à-dire ayant chaque année une chance sur 100 d'affecter le peuplement étudié.

Modèle de dommage après tempête et leçons tirées des données de 1999

Les dommages sur le peuplement ne dépendent pas seulement de la vitesse des vents de la tempête. Nous avons donc consulté les travaux de recherche conduits, suite à la tempête Lothar de 1999, afin de modéliser les dommages de tempête dans les peuplements forestiers du Nord de la France et du Sud-Ouest de l'Allemagne. Nous avons retenu le modèle de prédiction des dommages après tempête dans les hêtraies développé par Bock et al. (2005). C'est un modèle de prévision des taux de dommages qui distingue la part que prennent les caractéristiques du sol, l'exposition topographique et la hauteur du peuplement dans l'importance des dommages.

Comme la démarche d'optimisation n'est pas spatialisée, nous n'avons considéré que l'effet de la hauteur du peuplement et l'effet de seuil sur les taux de dommage. Bock et al. constatent que le taux de dommage est quasi-nul tant que la hauteur dominante du peuplement reste inférieure à un seuil de 23,5 m; au-delà, ce taux augmente assez rapidement.

Prix du hêtre

Comment traiter l'incertitude sur le prix des bois? Les prix du marché du hêtre sont très fluctuants, comme en témoigne l'analyse des cours observés pour les bois sur pied sur les 40 dernières années (article précédent, ce numéro). Cependant il s'en dégage deux scénarios, correspondant aux contextes économiques contrastés d'avant et après 1999, auxquels nous avons ajouté un 3e scénario qui reflète la « conjoncture actuelle » (2014). Pour ces trois scénarios, nous avons exprimé les prix du bois d'œuvre de hêtre en fonction du diamètre, en utilisant le modèle économétrique « simple » décrit dans l'article précédent (modèle 1 sans interaction, voir encadré p. 35 et tableau p. 36); modèle appliqué à l'année de vente médiane pour les deux premiers scénarios, et ajusté directement sur les données de 2014 pour le troisième. Ce qui donne pour le hêtre de qualité standard, correspondant au « 2° choix » du Cabinet Chavet :

- 1. pour la période 1974 1999, qui correspond à une forte demande : P = 1,68 d 21,60 (P est le prix du BO de hêtre en euros constants par m³, d est le diamètre en cm)
- 2. pour la période 2000 2013, où la demande diminue :

P = 1.68 d - 56.76

3. et en 2014 :

P = 0.48 d + 2.50

Le prix moyen du petit bois durant les trois périodes est estimé à 10€/m³.

Autres paramètres économiques et contraintes d'optimisation

Les **coûts des travaux** au stade juvénile (cf. état initial du peuplement) correspondent aux recommandations du guide des sylvicultures (Pilard-Landeau et Simon, 2008) pour les régénérations naturelles sans problème de densité sur terrain plat et sol non compacté : itinéraires techniques de travaux sylvicoles (ITTS) de régénération puis d'amélioration, respectivement codés « 1HET B » et « 5 HET C ». Ces coûts ont été réactualisés à l'aide des catalogues de prestation des travaux (document interne). Les contraintes de l'optimisation ont été fixées avec les experts de la sylviculture du hêtre : intensité de prélèvement maximale de 61 % et intervalle minimum de 6 ans entre les éclaircies. Enfin, le taux d'actualisation choisi pour un projet de longue durée comme l'est la sylviculture de hêtre est de 2 % (Quinet, 2013).

Résultats de l'optimisation

Les résultats de l'optimisation sont présentés dans le tableau 1 pour les trois scénarios économiques du marché du hêtre (demande forte, demande en baisse, conjoncture actuelle) : valeurs maximales du critère de Faustmann (ou valeur du fonds, ou BASI) et durées de révolution « optimales » correspondantes pour l'exemple traité, en distinguant l'effet de la prise en compte ou non du risque tempête.

Pour cette exemple de simulation, il ressort que le risque de tempête se traduit par un raccourcissement de 7 à 8 ans de la durée optimale de révolution et par une perte de valeur du fonds variant entre 21 % et 90 %

selon les contextes économiques. Si minime qu'il puisse paraître, sous les hypothèses retenues, ce raccourcissement est un résultat fort de la démarche d'optimisation, résultat d'ailleurs cohérent avec la littérature dans le domaine de l'économie des risques en forêt (Loisel, 2014; Price, 2011; Reed, 1984).

En période de prix élevés (forte demande de bois d'œuvre de hêtre comme en 1974-1999), les valeurs du fonds, avec ou sans risque tempête, sont positives, montrant que la sylviculture du hêtre est alors un investissement tout à fait rentable. Le net déclin des prix de la période 2000-2013 fait globalement baisser les valeurs du fonds de 69 % sans risque de tempête et de 97 % avec risque de tempête, mais elles restent positives. Cependant, dans la conjoncture actuelle (2014), le prix du hêtre est tellement faible que les valeurs du fonds sont devenues négatives.

Ces résultats montrent que les variations du prix des bois engendrent un impact économique plus important que les risques de tempête mais ne semblent pas vraiment influencer la durée de révolution optimale. Néanmoins, considérés simultanément, les deux types d'incertitudes ont des impacts significatifs sur la rentabilité de la hêtraie.

Nº du scénario	Contexte économique	Hypothèse de risque tempête	Durée de révolution (années)	Valeur du fonds BASI* (euros/ha)	Écart par rapport au scénario 1a
1a	Demande forte avec prix	non	109	3449,40	
1 b	soutenus (1974-1999)	oui	102	2327,46 (-33 %)**	-33 %
2a	Demande en baisse Prix plus faibles (2000-2013) Conjoncture actuelle	non	116	1 085,38	-69 %
2 b		oui	108	90,13 (-92 %)**	-97 %
3a		non	108	- 1894,19	-155 %
3 b	(2014)	oui	100	- 2297,90 (- 21 %)**	-167 %

^{*} Il est important de noter qu'ici les valeurs de Faustmann n'ont de sens que pour un usage de comparaison entre les scénarios.

Tab. 1 : comparaison des résultats de l'optimisation dans l'exemple étudié

^{**:} Les pourcentages entre parenthèse donnent l'écart du BASI avec prise en compte des tempêtes à la référence de BASI sans tempête dans le même contexte économique.

Conclusion

L'optimisation montre que la prise compte des risques tempêtes réduit la durée de révolution optimale du hêtre pour que la sylviculture reste un investissement « rentable ». Pour les hypothèses retenues sur la hêtraie Nord Atlantique (peuplement issu de régénération naturelle en fertilité moyenne, sans contrainte particulière de végétation concurrente, pente ou densité initiale...), cette prise en compte donne, à l'issue des simulations et calculs, une durée de révolution optimale assez proche des recommandations déjà en vigueur dans le quide des sylvicultures de I'ONF.

Par ailleurs, l'analyse de l'effet de risques multiples sur la forêt, montre que les incertitudes économiques (liées au marché du bois) engendrent des pertes économiques plus sévères que les incertitudes climatiques (tempêtes). En conséquence, le principal enjeu serait de développer et maintenir les industries de transformation des feuillus. C'est un enjeu stratégique pour les industries du bois mais également pour les gestionnaires forestiers du fait de la dépendance entre l'offre, la demande et les prix.

Cependant cette conclusion pourrait être infléchie si le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des tempêtes. Et surtout, il reste à étudier bien d'autres situations sylvicoles (autres régions, conditions de station, fertilité...), d'autres types de risques biotiques (maladies, cervidés...) ou abiotiques (hausse des températures, baisse des précipitations...). Il reste aussi à appréhender l'effet des évolutions du contexte socio-économique : paiement des autres services écosystémiques, mise en place de soutien public, modification des coûts des travaux sylvicoles, du taux d'actualisation, etc. De nouveaux travaux de recherche seront à développer à mesure de l'avancement des connaissances pour les intégrer dans des outils d'aide à la décision mis à disposition du gestionnaire forestier. D'autres échelles d'analyse comme la forêt, le territoire, la région... seront complémentaires.

À sa manière, cet article illustre donc la contribution possible des sciences économiques à la **démarche d'amélioration continue des guides de sylviculture** en fonction des informations disponibles, en montrant ici comment tenir compte à la fois du risque tempête et surtout des mutations de l'environnement économique.

Hanitra Rakotoarison ONF, département RDI

Patrice Loisel

INRA, Laboratoire MISTEA

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier le GIP Ecofor pour son soutien, en particulier financier; Gwenaelle Gibaud et Brigitte Pilard-Landeau de l'ONF pour leur appui et leur expertise dans le paramétrage et l'interprétation des résultats du modèle.

Bibliographie

Bock J., Vinkler I, Duplat P., Renaud J.-P., Badeau V., Dupouey J.-L., 2005. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999. Revue Forestière Française, vol. 58 n° 2, pp.143-158

Faustmann M., 1849. Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. Allgemeine Forst und Jagd Zeitung. Traduction française par Jacques Maheut (1999) sous le titre: « Calcul de la valeur que possèdent, du point de vue de l'économie forestière, les sols forestiers, ainsi que les peuplements non encore exploitables »

Le Moguédec G., Dhôte J.-F., 2012. Fagacées: a tree-centered growth and

yield model for sessile oak (Quercus petraea L.) and common beech (Fagus sylvatica L.). Annales des Sciences Forestières. Vol. 69 n°2 pp. 257–269

Loisel P., 2011. Faustmann rotation and population dynamics in the presence of a risk of destructive events. Journal of Forest Economics, vol. 17 pp. 235–247

Loisel P., 2014. Impact of storm risk on Faustmann rotation. Forest Policy and Economics, vol. 38, pp. 191-198

Peyron J.-L., Terreaux J.-P., Calvet P., Guo B., 1998. Principaux critères économiques de gestion des forêts : analyse critique et comparative. Annales des Sciences Forestières, vol. 55 n° 5, pp. 523-551

Pilard-Landeau, B., Simon, E., 2008. Guide des sylvicultures La Hetraie Nord-Atlantique. ONF, 154 p.

Price C., 2011. When and to what extent do risk premia work? Cases of threat and optimal rotation. Journal of Forest Economics. Vol. 17, pp. 53-66

Quinet E., 2013. Évaluation socio-économique des investissements publics, Premier Ministre. ed, Rapports et Document. Commissariat Général à la stratégie et à la prospective.

Reed W.J., 1984. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. Journal of Environmental Economics and Management vol. 11, pp. 180-190

Continuer la sylviculture de pin maritime malgré le risque tempête en Aquitaine?

À l'aube de ce 21° siècle, l'Aquitaine a connu trois tempêtes majeures en à peine plus de 10 ans : de quoi se faire du souci! Rechercher la profondeur historique, analyser méthodiquement, pour la région, les données du passé puis les hypothèses pour l'avenir et porter sur le tout un regard empreint de philosophie, c'est ce qu'on fait les auteurs de cet article pour dégager les éléments d'appréciation du risque les plus objectifs possibles. Il n'est pas possible ici d'exposer en détail ces travaux foisonnants, mais les principes et chemins du raisonnement sont intéressants.

n Aquitaine, le même sentiment prédomine : Lothar et Martin (1999), puis Klaus (2009), enfin Xynthia (2010) ont été qualifiées de tempêtes du siècle. Cela fait beaucoup. S'agit-il d'une simple malchance, ou bien n'est-il plus raisonnable d'y poursuivre la sylviculture de pin maritime? Rappelons que gérer une forêt, qu'elle soit publique ou privée, c'est aussi prendre certains risques. Un risque est généralement le croisement d'un aléa (par exemple la vitesse d'un vent tempétueux) et de la vulnérabilité d'un enjeu (ici l'état d'une forêt à fonction de production). Nous présentons ici quelques résultats de travaux réalisés sous l'égide du GIP Ecofor, portant sur l'évolution de l'aléa tempête en Aquitaine et quelques réflexions sur la décision en situation d'incertitude.

Un contexte d'incertitudes

Une des difficultés rencontrées lorsque l'on essaie d'avoir une idée de la fréquence de tels événements provient du fait que des observations sur une durée courte conduisent à une mauvaise estimation de l'aléa. Il nous faut alors des données climatiques sur de longues périodes. Mais le discours actuel est que les conditions climatiques auraient changé et que de ce fait les observations anciennes

apportent peu d'information, car ce que l'on cherche à faire c'est connaître les conditions du climat à venir.

Imaginons ainsi que l'on n'ait observé les tempêtes qu'entre 1999 et 2010; on pourrait certes bâtir une distribution empirique par laquelle de tels événements auront une durée de retour attendue de l'ordre de quelque trois ans, mais le biais d'observation serait évidemment très important.

Dans le même ordre d'idée, Bouleau (1991) dénonce le fait qu'il est difficile d'anticiper des événements de grande ampleur à partir d'observations sur des périodes durant lesquelles il ne se passe pas grand-chose. Car alors il y a risque de confusion entre les fréquences observées sur une période de temps relativement courte, et les probabilités de réalisation d'un événement dans le futur. Pour évaluer les risques encourus par la sylviculture, et finalement son intérêt économique, il nous faut aller un peu plus avant dans la représentation des aléas.

Dans le cadre d'un travail suscité par le GIP Ecofor, nous avons cherché à rassembler différentes données de manière à permettre aux sylviculteurs de pin en Aquitaine de prendre des décisions mieux informées. Si nous ne pouvons présenter ici faute de place l'ensemble des éléments collectés et les différentes méthodes de raisonnement, plus ou moins sophistiquées, au final la durée de retour de vitesses de vents observés en Aquitaine lors de la tempête Martin serait de l'ordre d'une cinquantaine d'années, et pour la tempête Klaus de plus de 150 ans (voir Terreaux et Chavet, 2015a).

« Davantage de tempêtes? » s'alarment les médias

Ces durées de retour se modifierontelles dans le futur? De nombreux articles de la presse généraliste font état de craintes sur une évolution défavorable des fortes tempêtes, qu'il s'agisse de leur fréquence ou de de leur intensité. Par exemple, le journal Sud-Ouest écrit, dans son édition du 27 septembre 2013 : « Davantage de phénomènes climatiques extrêmes – Autre certitude du rapport du GIEC : si les gouvernements ne réduisent pas de manière drastique les émissions de gaz à effet de serre, les événements extrêmes comme les vagues de chaleur, sécheresses, tempêtes, fortes précipitations ou inondations, conséquences directes de ce réchauffement climatique, devraient se multiplier et gagner en intensité. Cela devrait "parler", comme on dit, aux victimes des crues et des inondations qui ont ravagé

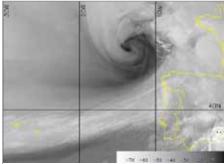
les Pyrénées et le Sud-Ouest de la France au printemps dernier. »

Dans ce type d'articles, les événements extrêmes (tempêtes mais aussi sécheresses, inondations, vagues de chaleur etc.) sont le plus souvent évoqués comme un seul ensemble, sans non plus de différenciation géographique, sans précision sur ce qui va précisément augmenter (la fréquence, l'étendue géographique, l'intensité). Les messages confondent aussi parfois l'évolution de moyennes (par exemple la température ou la pluviométrie moyenne) et les extrêmes, qui n'évoluent pas nécessairement dans le même sens ni avec la même intensité. Au final leur lecture est assez alarmiste, et conduit à une inquiétude sourde concernant le futur.

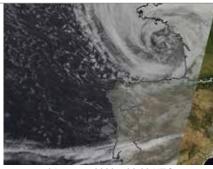
Les résultats scientifiques sont plus pondérés

La littérature scientifique est beaucoup plus pondérée. Par exemple, Gardiner et al. (2013) indiquent qu'il y a des preuves que le changement climatique va augmenter la sévérité des tempêtes dans les décennies prochaines. Mais leur travail porte sur l'ensemble de l'Europe. Et ils remarquent auparavant qu'une des limites de la littérature scientifique sur l'évolution des fréquences des tempêtes est l'ambiguïté de certains résultats : certains travaux concluent à une augmentation des vitesses de vents maximales au niveau local, tandis que d'autres anticipent une baisse de la fréquence des tempêtes pendant les dernières décennies de ce siècle...

Une bonne part de la littérature sur le sujet conduit effectivement à la conclusion qu'il n'est pas impossible qu'il y ait moins de tempêtes en Europe, mais qu'elles pourraient être de plus fortes intensités. Tout cela reste très hypothétique. Il se pourrait aussi qu'on constate une déviation des trajectoires des ouragans tropicaux et qu'ils puissent à l'avenir atteindre les côtes du Golfe de Gascogne.



23 janvier 2009 – 18:00 UTC Image satellite-Vapeur d'eau



24 janvier 2009 – 02:28 UTC Image satellite infrarouge

Moins de 10 ans après Martin (27 décembre 1999), la tempête Klaus secoue les Aquitains Klaus est ce que les météorologistes appellent un cyclone extratropical



En quelques heures, une grande partie des forêts landaises est à terre



Deux ans plus tard, le journal Les Echos (25/01/2011) titre sur « L'avenir incertain de la forêt landaise » avec cette image

European Meteorology and Ocean ©Naval European Meteord Center - US Navy / NOAA

D'autres régions de l'Europe (Europe centrale et de l'Est, Europe du Nord par exemple) pourraient connaître une évolution différente, plus défavorable. Ce qui indirectement, pour les sylviculteurs, pourrait in fine conduire à des prix du bois plus fluctuants, même si l'Aquitaine n'est pas directement concernée.

Il n'y a pas que le risque vent

En nous limitant au seul risque de tempête, nous n'examinons pas ici les autres impacts possibles du changement climatique annoncé, par exemple les modifications du régime des pluies, des températures, analysées par leurs moyennes et aussi par leurs valeurs extrêmes, qui peuvent avoir un impact direct sur la croissance des arbres. Pour en revenir aux tempêtes, la résistance des arbres au vent peut être modifiée par exemple par une évolution de l'enracinement, une humidité différente des sols etc.; ce qui signifie une vulnérabilité modifiée, même si l'aléa (le vent de tempête) ne change pas. En outre les arbres sont des végétaux qui intègrent (au sens de faire la somme au fil du temps) sur de longues périodes tout un ensemble de facteurs et de décisions. C'est l'ensemble de ces facteurs qui mérite d'être pris en compte.

Décider en situation d'incertitude

C'est dans cette situation d'incertitude que des décisions sont à prendre en sylviculture (investir ou non, récolter, vendre, planter, élaguer, éclaircir, etc.), sans attendre de pouvoir acquérir plus d'informations. Car il n'est pas certain que le futur apportera plus de précisions sur les climats à venir, concernant les risques de tempêtes. D'une part à cause de la nature physique des différentes interactions qui les rend peu prévisibles (les tempêtes sont issues de systèmes instables). D'autre part parce que l'on n'a qu'une représentation très parcellaire de ces phénomènes, pour lesquels plus de connaissances apporteront principalement une compréhension plus fine de la complexité, sans nécessairement que cela induise une meilleure anticipation des futurs possibles.

Une décision en sylviculture, qu'il s'agisse de forêts privées ou publiques, n'est pas en général une initiative ex abrupto : c'est un élément dans une suite de décisions, et cela change tout. En théorie les actions antérieures ne devraient avoir aucun impact sur les décisions présentes et futures, et seuls devraient compter l'état présent, de la forêt, du patrimoine... et les anticipations du futur (dont le climat, mais aussi les besoins financiers du propriétaire (privé, commune, État), plus ou moins bien cernés, avec plus ou moins d'incertitudes; mais ce n'est pas la question ici). En réalité, cependant, deux phénomènes majeurs vont intervenir.

La théorie de l'engagement et la transmission des valeurs

Premièrement, une persévérance qu'on explique par la théorie de l'engagement (voir par exemple Kiesler, 1971 : « l'engagement est le lien qui unit l'individu à ses actes »). Cela consiste à poursuivre ce qui a été entrepris, voire à l'accentuer, et éventuellement à tenter d'accumuler des éléments qui vont dans le sens des actions passées. Finalement il s'agit d'une méthode de justification qui est le contraire d'une démarche scientifique, qui conduit à poursuivre les investissements passés, même si beaucoup d'indices conduisent à penser qu'ils ne sont pas très rentables.

Deuxièmement, le conservatisme (au sens ancien et positif du mot, sens qu'il perdit par la suite; voir Ellul, 2014) pour retrouver et transmettre des valeurs (altruisme, attention portée à la nature etc.). C'est une catégorie d'inertie, non pas par absence de dynamisme, mais parce que les valeurs les plus profondes sur lesquelles repose la foresterie ne changent pas, qui conduit à poursuivre ces actions en forêt, malgré

une conjoncture fluctuante, malgré aussi les alarmistes aux prédictions sans cesse mouvantes.

Ces deux éléments peuvent être aussi indirectement générateurs d'inquiétudes fortes, pour le propriétaire sylviculteur, sachant qu'il ne peut facilement infléchir la conduite de ses peuplements, voire sortir de la sylviculture, dans laquelle il peut se sentir piégé; toute information nouvelle sur l'évolution du climat, incertaine (l'information) et portant sur un élément fondamentalement aléatoire (le vent), finit non pas par éclairer sa décision, mais par le tourmenter.

Rationalité, esprit de géométrie et esprit de finesse

La difficulté pour un gestionnaire forestier, est finalement d'arriver à distinguer, dans ces anticipations sur le climat futur, ce qui est rationnel, fondé ou pas, plausible ou pas. Depuis Cournot (1851) on sait que tout homme a une certaine propension à chercher et surtout à reconnaître, ou à estimer reconnaître, des formes et des structures, qu'elles soient spatiales ou temporelles. Ainsi, en dehors de tout calcul de probabilité, la répétition de plusieurs événements (tempêtes Lothar et Martin, Klaus, Xynthia) va l'inciter à croire à une fréquence forte de tels sinistres; d'ailleurs même si les tempêtes n'ont pas frappé dans les mêmes régions, les médias, en nous faisant vivre en direct ces cataclysmes, atténuent nos repères quant à leur éloignement géographique. Ces présomptions de régularités reposent sur des éléments subjectifs et n'ont que peu de rapport avec des probabilités bien définies et quantifiables, assimilées à la fréquence d'un événement dans une longue série d'observations en un lieu donné.

Mais ce n'est pas fini : Une fois convaincu de tel ou tel argument, il faut ensuite que le sylviculteur puisse l'intégrer dans tout un ensemble d'autres informations passant ainsi, pour reprendre les termes de Pascal (1669), de l'esprit de géométrie à

l'esprit de finesse, c'est-à-dire arriver à concevoir que, tous comptes faits, intuitivement et sans arriver nécessairement à en expliciter clairement les principaux ressorts, il semble raisonnable de continuer ou d'arrêter telle ou telle entreprise.

Les indications du GIEC

Dans son « résumé à l'intention des décideurs » de 2012, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; IPCC en anglais) rappelle que pour les événements extrêmes, qui sont rares par nature, peu de données sont disponibles, et qu'il est difficile de faire des estimations concernant des modifications de leur fréquence ou de leur intensité (voir Terreaux et Chavet, 2015 b).

Le rapport complet du GIEC a été rendu public dans une version définitive en mars 2014. Un des quelques résultats portant sur l'Europe pour le groupe de travail ayant étudié les « Impacts adaptations et vulnérabilités » (Groupe 2, chapitre 23) pour lesquels le GIEC est moyennement confiant est qu'il y ait un glissement vers le nord des trajectoires des tempêtes extra-tropicales (il y a cinq niveaux de confiance : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé). Un autre résultat pour lequel le GIEC est à nouveau moyennement confiant, est qu'il y aura une réduction du nombre moyen de cyclones extra-tropicaux pour chacun des deux hémisphères. Mais il y a peu de confiance dans des tendances observées pour les phénomènes à petite échelle, tels que les tornades, à cause de problèmes de données non homogènes et d'inadéquation de systèmes de mesure, et aussi du fait que « divers processus physiques concurrents pourraient infléchir les tendances et parce que les modèles climatiques actuels ne simulent pas ce genre de phénomènes ».

Le même document indique que les vitesses de vents (dits de surface, par opposition à ceux d'altitude) des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord déclinent, avec un déclin accentué des vitesses de vents forts. Cela étant, lorsque l'on se reporte à la publication source de Vautard et al. (2010), il apparaît qu'entre 1978 et 2008, ce déclin des vitesses du vent, de 5 à 15 %, a des causes qui restent incertaines, mais qui sont probablement dues en partie (pour 25 à 60 % du déclin) à une modification de la rugosité des sols (suite à une modification de l'usage des sols). En revanche, des accroissements possibles du risque tempête sur l'Europe, dû notamment aux changements de trajectoire des tempêtes, sont mis en avant par plusieurs études régionales (voir par exemple Donat et al. 2011); cette augmentation, très incertaine, pourrait être pour le nombre de jours de vents forts, de l'ordre de quelques dizaines de pourcent par rapport à la situation présente, d'ici la fin du présent siècle.

D'autres types d'incertitudes

Il demeure beaucoup d'incertitudes quant aux effets de l'évolution climatique sur le risque tempête, et nous pensons que cette incertitude restera, tout au moins pour les décennies à venir, vu la complexité des questions à résoudre et le caractère fondamentalement chaotique des dynamiques en cause. Mais les données actuelles ne justifient pas l'entretien d'une crainte diffuse sur une augmentation avérée de ce risque pour l'Aquitaine. Les échelles assez grossières des modèles conduisent cependant à rester prudent.

Cela étant, pour le pin maritime d'Aquitaine, et si l'on classe les incertitudes par ordre d'importance en tenant compte des aléas et des enjeux associés (la vulnérabilité), il nous semble que les incertitudes réglementaires (ou sur la propriété forestière) et fiscales, les risques biotiques (dont le nématode du pin) et le risque incendie, toujours présent, méritent eux aussi que l'on reste attentif à leurs évolutions. On souli-

gnera cependant que si l'incertitude fiscale et réglementaire est du ressort de l'homme, s'il est possible de lutter efficacement par des mesures de prévention et d'intervention contre la propagation des incendies, il n'est pas possible pour le sylviculteur de diminuer l'aléa tempête, et son seul outil pour diminuer le risque sera de diminuer sa vulnérabilité (par une modification de la sylviculture, de l'aménagement de la forêt, de la diversification de son patrimoine) (voir article suivant de ce numéro).

On rappellera aussi que l'évolution climatique ne se réduit pas à l'évolution du risque tempête. Enfin, concernant les aspects probabilistes, on soulignera qu'une baisse éventuelle de la probabilité des tempêtes, par exemple, n'implique pas la prévision, ni même la suggestion, d'une absence ni même d'une diminution du nombre de tempêtes dans les prochaines années.

Jean-Philippe Terreaux Irstea Bordeaux Unité de recherche ETBX

Michel ChavetCabinet Michel Chavet, Paris

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier le GIP Ecofor pour son soutien, en particulier financier.

Références

Bouleau N., 1991, Splendeurs et misères des lois de valeurs extrêmes, Centre de Mathématiques appliquées de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 10 p.

Cournot A.A., 1851. Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique. Nouvelle édition, 1912. Paris : Hachette. 614 p.

.../...

Donat M.G., Leckebusch G.C., Wild S., Ulbrich U., 2011. Future changes of European winter storm losses and extreme wind speeds in multi-model GCM and RCM simulations. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 11(5), pp. 1351-1370

Ellul J., 2014. article « conservatisme », Encyclopaedia Universalis, ultime édition.

Gardiner B., Schuck A., Schelhaas M. J., Orazio C., Blennow K., Nicoll B. (Eds.), 2013. Living with storm damage to forests. What science can tell us? European Forest Institute, 129 p.

IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernemental Panel on Climate Change (IPCC), 594 p.; voir aussi IPCC, 2014, IPCC Working Group 2, AR5 Chapter 23 Final Draft, Chapter 23 – Europe, 93 p.

Kiesler C.A., 1971. The Psychology of Commitment. Academic Press, New York.

Terreaux J. Ph., M. Chavet, 2015a. Sur la durée de retour d'une tempête dévastatrice en forêt d'Aquitaine. Mimeo, 33 p.

Terreaux J. Ph., M. Chavet, 2015 b, Le changement climatique entrainera-t-il une augmentation du risque de vents tempétueux dommageables pour les sylviculteurs de pins maritimes du sud-ouest? Mimeo, 25 p.

Vautard, R., J. Cattiaux, P. Yiou, J.-N. Thepaut, and P. Ciais, 2010, Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. Nature Geoscience, vol. 3(11), pp.756-761







Continuer la sylviculture malgré le risque, c'est aussi penser logistique : déblayer, exploiter, commercialiser

Risque de tempête et viabilité : une approche économique de l'aménagement forestier

La théorie de la viabilité est très différente de l'optimisation en ce sens qu'elle permet une approche économique de la gestion forestière qui voit plus large que l'itinéraire sylvicole de production à la parcelle et permet d'évaluer les décisions d'aménagement forestier. On ne trouvera pas ici le détail des concepts, des hypothèses et de l'architecture qui sous-tendent cette modélisation complexe, mais un exposé simple du principe et un exemple d'application à la gestion d'une pinède aquitaine.

es critères économiques de la gestion forestière et de l'aménagement sont fondés le plus souvent sur des méthodes d'optimisation statique ou dynamique, tenant compte ou pas des aléas. Ces méthodes ont bien sûr leur intérêt par exemple lorsqu'il s'agit de faire un calcul d'estimation de valeur. Mais il est clair que dans la réalité quotidienne on cherche rarement à optimiser un objectif, que l'on serait bien en mal de définir. La théorie de la viabilité pourrait être une voie nouvelle. Nous l'appliquons ici à une forêt de pin maritime.

État de l'art

Schématiquement, le principal objet de l'aménagement forestier et de l'économie forestière est de programmer les interventions, notamment la coupe de régénération des peuplements, de façon à percevoir les fruits des investissements effectués sur de longues années et de recommencer une nouvelle révolution.

Si on raisonne à la parcelle, que l'on ne tient pas compte des risques et que l'on cherche à maximiser la valeur économique de la forêt, ce problème trouve une solution de manière assez intuitive avec le critère de Faustmann (1849) : une parcelle doit être récoltée lorsque la croissance des arbres devient trop faible pour contrebalancer le produit que l'on retirerait si on vendait le tout (les arbres, le sol forestier) et que l'on plaçait l'argent à la banque sur un placement sans risque (ce qui suppose aussi un tel placement possible).

Évidemment le problème réel est éminemment plus complexe, puisque les parcelles d'une même forêt ne sont pas gérées indépendamment, puisque cette gestion fait intervenir de tout autres considérations que financières, et puisqu'il y a des risques, aussi bien en forêt que pour les placements à la banque. Et puis surtout l'aménagement de la forêt va rechercher à « maintenir au fil du temps à un niveau égal ou amélioré, les fonctions assignées à la forêt » (Dubourdieu, 1997). Cette stabilité des fonctions de la forêt peut se réaliser selon plusieurs méthodes. L'illustration la plus simple est le traitement en futaie régulière d'une essence unique, l'objectif étant de calculer un âge optimal d'exploitabilité, puis d'adopter une stratégie de coupe permettant d'atteindre un équilibre entre les parcelles, conduisant à la stabilité des produits et services issus de la forêt, et à la pérennité de la forêt dans son ensemble. Un traitement en futaie irrégulière ou en futaie jardinée, s'il est bien mené, permettrait aussi d'atteindre cet objectif.

Dans le cadre de l'aménagement d'une forêt en futaie régulière, l'âge optimal d'exploitabilité provient en général d'un raisonnement d'optimisation déterministe, c'est-à-dire ne faisant pas intervenir les risques. Il en est de même pour la surface à régénérer d'équilibre Se = S.d/A (si l'ensemble des stations a la même productivité) : Se est la surface à récolter pendant la durée d de l'aménagement, S la surface de la forêt et A l'âge optimal d'exploitabilité (cf. Dubourdieu, 1997).

Le problème est que les forêts sont immergées dans tout un ensemble de risques, naturels ou économiques, qui vont perturber ce bel ordonnancement, conduisant à réajuster l'âge optimal A, ou modifiant totalement l'histogramme des surfaces par classes d'âge; par exemple les tempêtes pourront conduire à reboiser rapidement une grande partie de la forêt, voire sa totalité. Cette recherche de régularité s'apparente ainsi au mythe de Sisyphe.

De nouveaux outils de calcul économique nous permettent aujourd'hui d'appréhender autrement l'aménagement forestier. Un premier pas fut fait en quittant les modèles d'optimisation statique (tels qu'illustrés par les calculs précédents) pour aller vers des modèles d'optimisation dynamique.

Parmi ces derniers, les modèles dits de contrôle impulsionnel font partie des plus pertinents : ils associent généralement une dynamique continue (par exemple la croissance des arbres) et des phénomènes discontinus, les impulsions (la coupe des arbres que l'on décide, ou les tempêtes que l'on subit). Mais cette représentation de l'évolution de la forêt conduit à des problèmes mathématiques difficiles à résoudre, même si une solution peut être trouvée dans certains cas, et si l'on retrouve bien comme cas particulier le critère de Faustmann que l'on a évoqué précédemment (voir Willassen, 1998) lorsque l'on suppose que la probabilité de tempête tend vers zéro.

La théorie de la viabilité

La théorie de la viabilité (Aubin, 1991, 2010) permet une toute autre approche. Il ne s'agit plus de rechercher un optimum, mais d'avoir une solution « viable » qui satisfait une contrainte ou un ensemble de contraintes; par exemple on pourra souhaiter avoir un niveau « plancher » de récolte annuelle de bois. Cette approche par la viabilité est séduisante, car c'est plutôt ainsi que nous résolvons de nombreux problèmes chaque jour : pour faire un trajet en voiture, assez souvent nous n'optimisons rien (ni recherche d'une distance minimale, ce qui conduirait à couper les virages, d'une consommation minimale, ce qui nous prendrait beaucoup de temps, ni encore d'un temps de trajet minimal, ce qui serait dangereux); en revanche, nous adaptons en permanence notre conduite pour satisfaire un ensemble de contraintes implicites (rester sur une certaine portion de la chaussée, et avec une certaine vitesse qui dépend des autres utilisateurs de la route, etc.).

C'est cette approche que nous proposons d'utiliser ici, avec comme exemple d'application la gestion d'une forêt de pin maritime soumise au risque tempête. Dès lors qu'on inclut ce risque, on ne peut pas se fixer la contrainte d'une récolte annuelle « plancher », comme précédemment : en effet une tempête peut avoir tout abattu, et il faut un temps assez long pour que les arbres replantés soient récoltables à leur tour. On notera aussi que dans ce cas toutes les parcelles vont être synchrones (vont avoir le même âge) et que la forêt courra de grands risques vis-à-vis du vent quand les arbres prendront de la hauteur, sauf si l'on prend des mesures adaptées.

C'est pour cela que la contrainte de viabilité va porter sur un niveau de risque que le gestionnaire ou propriétaire est prêt à assumer. Il nous faut alors définir une mesure du risque. Pour être pertinente, cette mesure doit avoir un certain nombre de propriétés mathématiques (voir Artzner et al., 1999), qui conduisent à éliminer certaines fonctions candidates. Ainsi, nous devons écarter la notion de « value at risk » familière aux compagnies d'assurance; en revanche, l'« expected shortfall » est bien une mesure de risque (voir encadré).

Nous chercherons alors à définir des stratégies d'aménagement de la forêt de manière à ce que le risque encouru à l'avenir, en poursuivant cette stratégie, ne soit pas trop grand, c'est-à-dire que cette mesure ne descende pas sous un certain seuil. C'est la contrainte de viabilité.

Définir une stratégie de gestion simple et stable

On ne cherchera ainsi plus un équilibre des classes d'âge pour la forêt, mais simplement on tiendra à satisfaire à l'avenir, sur un horizon infini (en pratique on se satisfera de 300 ans), cette contrainte de viabilité. La variable de commande, pour obtenir cet effet, est la stratégie de gestion que nous allons choisir.

Les stratégies de gestion vont consister à désynchroniser, ou pas, l'âge des arbres entre les parcelles, de manière à éviter qu'au fil du temps le patrimoine exposé ne soit trop important, c'està-dire que le risque (mesuré comme indiqué précédemment) ne soit trop grand. On veillera à ce qu'elles correspondent à des règles d'aménagement à la fois simples à appliquer et stables sur le long terme. Ces qualités sont particulièrement importantes pour les forêts privées : il semble peu opportun de confier aux propriétaires, de plus en plus urbains comme l'ensemble de la population, des méthodes mouvantes et compliquées à employer, à cause de l'éloignement géographique et des difficultés à rassembler les connaissances et informations qui seraient nécessaires pour mettre en œuvre de telles méthodes. Et même si la gestion des forêts est confiée à des « hommes de l'art », s'ajoute aussi tout un ensemble de contraintes réglementaires ou liées au terrain, qui peuvent augmenter la complexité et l'instabilité du contexte.

Exemple d'application

Prenons l'exemple concret sur lequel nous avons réalisé différents calculs, celui d'une forêt composée de 12 parcelles équiennes de pins maritimes, d'un hectare chacune (figure 1). On examine périodiquement si les parcelles sont synchrones ou pas : on considérera qu'elles le sont si l'écart entre l'âge des arbres les plus âgés et celui des arbres les plus jeunes est de moins de 20 ans. Dans ce cas on applique une des stratégies de désynchronisation suivantes, que l'on aura choisie au préalable et que l'on conservera au fil du temps :

- stratégie 1 : pas d'action particulière, on s'en tient à l'âge « optimal » d'exploitabilité;
- stratégie 2 : on repousse de 5 ans l'âge de coupe des 6 parcelles les plus jeunes;
- stratégie 3 : on repousse de 10 ans l'âge de coupe des 6 parcelles les plus jeunes et on avance de 5 ans l'âge de coupe des 6 parcelles les plus âgées;
- ... et autres stratégies étudiées, notamment en avançant plutôt qu'en repoussant l'âge de coupe des arbres.

Bien entendu, si une tempête survient après l'application de la stratégie choisie, c'est-à-dire après avoir subi une impulsion sur l'état du système (l'état de la forêt), il peut être nécessaire, ou pas, de désynchroniser à nouveau les parcelles.

Au total, lorsque l'on utilise dans le modèle de viabilité un modèle réaliste de croissance des pins et une estimation à dire d'expert des différents coûts et recettes, on obtient des conclusions assez différentes de celles obtenues par un modèle d'optimisation pour une parcelle individuelle, indépendamment de l'état du reste de la forêt.

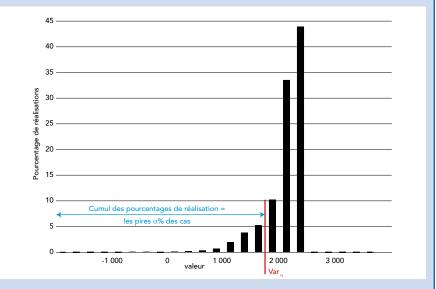
Par exemple, pour une parcelle isolée, un résultat bien connu est que l'augmentation du risque tempête doit se traduire par une réduction des révolutions (c'est-à-dire de l'âge de coupe des arbres; voir Reed, 1984). Cela rejoint l'intuition que le capital sur pied que représentent les arbres est soumis à un risque plus important, et qu'il est optimal de réduire ainsi la vulnérabilité. Mais dans notre modèle de viabilité nous tenons compte du fait que c'est la vulnérabilité de l'ensemble de la forêt qui doit être considérée, et pas celle de chacune des parcelles considérée isolément. Or pour la forêt dans son ensemble, la vulnérabilité est moindre lorsque les arbres n'ont pas tous approximativement le même âge. En effet, si les arbres sont tous matures en même temps, ils sont plus vulnérables à un coup de vent, et le capital exposé (la valeur qu'ils représentent) est plus élevé. C'est pourquoi il y a intérêt à désynchroniser les âges des arbres d'une parcelle à l'autre.

Cette désynchronisation peut se faire soit en avançant, soit en reculant l'âge de coupe des arbres par rapport à l'âge « optimal ». Dans les deux cas, cela entraine au regard de l'optimum des pertes qu'on appelle sacrifices d'exploitabilité. Sur notre exemple, nous avons trouvé pour notre cas d'étude, après de nombreuses simulations, que ces pertes étaient plutôt plus élevées en avançant qu'en

Choix d'une mesure de risque

La littérature propose de nombreux travaux, selon différentes approches, sur ce qui pourrait constituer des mesures de risque. Nous avons examiné celles qui pouvaient être les plus susceptibles de correspondre au problème de l'aménagement forestier, notamment la notion de « value at risk », assez utilisée par les compagnies d'assurance.

Quand on considère la distribution des probabilités de l'ensemble des situations possibles, la « value at risk » de probabilité α (VaR α) est la valeur maximale que l'a variable considérée peut atteindre dans les pires α % des cas (figure). Par exemple dans les pires 5 % des cas éventuels de réalisation de tempête, on ne récoltera au mieux, dans la forêt de notre modèle, que 100 m³/an. Cependant la VaR α n'est pas ici une mesure de risque car elle ne tient pas compte de la distribution de probabilité en-deçà de VaR α ; or pour un même niveau de VaR α , cette distribution peut être très différente d'une forêt à l'autre, traduisant un niveau de risque différent.



Résultats induits par la réalisation ou non de tempêtes sur la valeur de la forêt (liée aux possibilités de récolte de bois)

En revanche l'« expected shortfall » l'espérance mathématique de récolte correspondant à la distribution de ces pires α % des cas est bien, quant à elle, une mesure de risque (Sur le plan mathématique, il s'agit de l'espérance de gain sous contrainte que le gain soit inférieur à une certaine valeur, cette valeur étant la $VaR\alpha$). C'est elle que nous avons retenue dans ce travail.

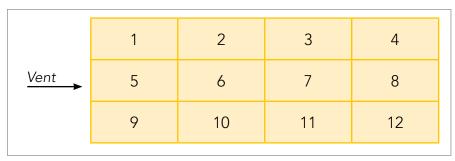


Fig. 1 : la forêt du modèle, composée de 12 parcelles de 1 ha

Simple voire simpliste mais...

Les parcelles 1, 5 et 9 sont en position de lisière exposée, et sont donc plus sensibles au vent. Pour les autres, cela dépend de l'historique de gestion des parcelles au vent : l'effet lisière des parcelles sous le vent diminue de manière linéaire au fur et à mesure que les arbres croissent sur la parcelle au vent, pour s'annuler quand ces arbres atteignent 20 ans.

reculant l'âge de coupe des arbres pour une partie des parcelles. Cela est dû au fait que l'âge financièrement optimal de coupe des pins correspond à une période de croissance biologique encore assez forte. Récolter plus tôt que l'optimum conduit à se priver d'une partie de cette période. Récolter plus tard conduit à immobiliser des capitaux plus longtemps en forêt, mais cela est un peu compensé par la croissance des arbres. Bien entendu, de nombreux facteurs (par exemple des hypothèses sur les prix, le taux d'actualisation....) peuvent conduire à des conclusions différentes.

Sensibilité des résultats

Dans nos simulations nous avons utilisé les données de l'IGN (ex-IFN) sur l'impact des tempêtes de 1999 et 2009 sur les forêts d'Aquitaine, afin de calibrer différents paramètres. À cette fin nous avons utilisé les travaux de Cucchi (2004) pour calculer la résistance des arbres aux tempêtes. Il se trouve que lors de la tempête de 2009 (Klaus) les arbres anciens ont mieux résisté au vent proportionnellement aux surfaces concernées. Mais cette moindre sensibilité constatée des arbres les plus âgés pourrait être due au fait que ces arbres sont issus de pratiques culturales (par exemple semis au lieu de plantations) différentes, et de ce fait ne plus être valable pour les arbres des générations suivantes; ce qui pourrait fausser les résultats des simulations qui concernent le futur. Nous avons fait d'autres simulations, sans laisser décroître la sensibilité des arbres au vent en fonction de leur âge. Ce qui en ressort n'est pas modifié sur le plan qualitatif, et les résultats précédents sont donc robustes sur ce point.

Nous avons aussi réalisé différentes études de sensibilité vis-à-vis des paramètres les plus importants, notamment le taux d'actualisation et la fréquence des tempêtes. Pour le premier paramètre, plus le taux est faible (plus on prend en compte les résultats des années futures), plus les sacrifices d'exploitabilité des premières années sont « amortis » par un impact accru d'une moindre vulnérabilité dans les années suivantes. En ce qui concerne les paramètres climatiques, nous avons constaté que si les résultats de la sylviculture en dépendent étroitement, la stratégie d'aménagement (voir section précédente) qui conduit au meilleur résultat, quant à elle, ne change pas lorsque les paramètres se dégradent sur une plage relativement large.

La viabilité et l'optimisation ne s'opposent pas

Ainsi les méthodes de viabilité, qui ne s'opposent pas aux méthodes d'optimisation mais les complètent, paraissent bien adaptées à la gestion d'un patrimoine forestier exposé au risque tempête. Elles présentent un caractère opérationnel au moins équivalent à celui des critères d'optimisation. Et surtout elles paraissent plus intuitives. Elles sont fondées sur des développements théoriques, que nous n'avons pas développés ici, qui font intervenir des systèmes « hybrides », mêlant une croissance continue des arbres interrompue soit par un contrôle impulsionnel (les coupes), soit par un élément extérieur (les tempêtes) impulsionnel lui aussi.

Notons cependant que nous avons recherché la viabilité des valeurs prises par une mesure du risque encouru par le patrimoine forestier sur le plan financier, et pas la viabilité de la forêt elle-même; ce qui implique que les différentes aménités et externalités induites par la présence de forêt peuvent quant à elles subir des variations (pouvant obérer la viabilité d'entités qui en dépendent) non prises en compte ici. Il s'agit donc de pistes à engager pour des travaux futurs.

Jean-Philippe Terreaux Irstea Bordeaux Unité de recherche ETBX

Michel ChavetCabinet Michel Chavet, Paris

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier le GIP Ecofor pour son soutien, en particulier financier.

Références

Aubin J. P., 1991, Viability Theory, Birkhauser, Boston, 545 p.

Aubin J.P., 2010, La mort du devin, l'émergence du demiurge. Essai sur la contingence, la viabilité et l'inertie des systèmes, Ed. Beauchesne, 896 p.

Artzner P., Delbaen F., Eber J.M., Heath D., 1999. Coherent measures of risk. Mathematical Finance, vol. 9(3), pp. 203–228

Cucchi V., 2004, Sensibilité au vent des peuplements de pin maritime (Pinus pinaster Ait.), Analyse comparative de dégâts de tempête, étude expérimentale et modélisation de la résistance au déracinement. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 185 p.

Dubourdieu J., 1997, Manuel d'aménagement forestier. ONF, Lavoisier Technique et Documentation, Paris, 244 p.

Faustmann M., 1849, Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. Allgemeine Forst und Jagd-Zeitung, n° 25, pp. 441-455

Reed W.J., 1984, The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. Journal of Environmental Economics and Management, vol. 11(2), pp. 180-190

Terreaux J.P., 1996, Gestion des forêts: rentabilité et durabilité sont-elles opposables? Cahiers d'économie et sociologie rurales, n° 41, pp. 133-147

Willassen Y., 1998, The stochastic rotation problem: A generalization of Faustmann's formula to stochastic forest growth. Journal of Economic Dynamics and Control, vol. 22(4), pp. 573-596

Prise en compte des Chiroptères à l'échelle d'un aménagement forestier Exemple de Rambouillet et perspectives méthodologiques

La révision d'aménagement forestier est par excellence le moment des décisions qui assurent la gestion durable et multifonctionnelle. Cependant, en dépit de quelques principes bien admis sur la façon de concilier production et biodiversité, l'aménagiste est parfois démuni pour organiser, notamment, les opérations de renouvellement. À partir de l'expertise acquise sur le massif (complexe) de Rambouillet, les auteurs proposent ici, arguments à l'appui, une méthode qui repose sur les besoins des Chiroptères et qu'on peut appliquer à d'autres forêts, même en l'absence de données naturalistes.

a conservation de la bio-I diversité en forêt est l'un des piliers de la gestion forestière durable. Les mesures à appliquer dans ce domaine sont encadrées à l'ONF par l'Instruction INS-09-T-71 pour la conservation de la biodiversité dans la gestion courante des forêts publiques, qui souligne notamment la nécessité de maintenir des vieux bois pour assurer le maintien des espèces saproxyliques. Concilier production de bois et préservation de la biodiversité peut néanmoins soulever des difficultés, en particulier pour la programmation des coupes. C'est surtout dans le cadre de l'élaboration de l'aménagement forestier que doit se réfléchir et s'organiser la prise en compte des différents enjeux à l'échelle d'une forêt.

La forêt de Rambouillet (78) présente pour la conservation des Chiroptères un enjeu reconnu. Elle a fait l'objet de plusieurs programmes scientifiques visant à mieux comprendre les interactions entre les Chiroptères et l'écosystème forestier. Ces espèces sont en haut de la chaine trophique et intègrent les pressions exercées de l'environnement sur les espèces liées aux vieux bois (les espèces



Murin de Natterer et un de ses gîtes favoris, fente sur arbre vivant

saproxyliques en particulier). Elles sont aussi de bons candidats pour appréhender les problématiques de continuité spatiale et temporelle des habitats favorables à la biodiversité forestière. Pour toutes ces raisons, nous avons voulu considérer la biodiversité saproxylique à travers le « filtre Chiroptères » dans l'aménagement de la forêt domaniale de Rambouillet, en nous projetant à échéance de trois aménagements. L'exercice, qui suppose d'abord la construction d'une carte des enjeux

pour les Chiroptères, a montré que cette profondeur temporelle permettait de concevoir des solutions conciliant production, biodiversité et contraintes de paysage.

Nous présentons ici l'ensemble de cette démarche, dont nous illustrons l'aboutissement à travers quelques exemples précis. Nous proposons aussi des principes applicables pour les forêts qui justifient ce type d'approche mais qui ne disposent pas toujours de données naturalistes.

Pourquoi les Chiroptères?

Les Chiroptères, espèces vulnérables réfugiées en forêt

Depuis les années 1960, les Chiroptères ont subi en Europe divers dommages qui ont contribué à voir leurs effectifs chuter dramatiquement pour certaines espèces (Arthur et Lemaire 2009). Dans un tel contexte, les scientifiques s'accordent à dire que la forêt est probablement le milieu qui a subi le moins de modifications dans nos paysages, donc qu'elle joue aujourd'hui un rôle prépondérant pour la conservation de la plupart de ces espèces qui y ont trouvé refuge (Arnett 2003; Kunz et Fenton 2003; Lacki, Hayes et Kurta 2007; Mayle 1990). Pour autant, les Chiroptères restent vulnérables même en forêt dans la mesure où la gestion forestière induit une modification temporelle et spatiale continuelle de leurs habitats et des ressources qui leur sont nécessaires, comme les cavités disponibles (Lacki, Hayes et Kurta 2007).

Cependant les caractères qui les rendent vulnérables en font aussi un bon modèle écologique pour aider à la compréhension de la relation entre biodiversité et forêt (Tillon 2008) :

- ces animaux vivent longtemps (plusieurs dizaines d'années) et en colonies plus ou moins territoriales selon les espèces,
- ils se déplacent la nuit en utilisant un système d'écho sonar, qui leur impose de suivre certains repères végétaux du paysage pour progresser dans leur domaine vital, voire pour chasser,
- ils utilisent une large gamme d'habitats en forêt, entre des cavités arboricoles de type trou de pic ou fissure étroite et différentes structures de végétation selon les espèces pour s'alimenter.

S'ils étaient difficiles à étudier, à inventorier et à suivre en forêt il y a encore 20 ans, l'amélioration des méthodes et des techniques permet aujourd'hui de les suivre si besoin sur le long terme et de développer des modélisations sur leur lien à

l'écosystème forestier. Les Chiroptères peuvent donc être considérés comme de bons indicateurs biologiques (au sens très pratique du terme).

Les Chiroptères peuvent incarner la biodiversité arboricole dans l'aménagement

Diverses études ont montré, comme on pouvait s'en douter, que la distribution des différentes espèces de Chiroptères dans un massif forestier n'est pas homogène et qu'elle dépend de la structuration spatiale des habitats disponibles (Archaux et al. 2013; Tillon et al. 2014). Ce résultat renvoie à une contrainte majeure pour ces espèces : chaque colonie doit trouver sur son domaine vital l'ensemble de ses habitats préférentiels (pour gîter et s'alimenter), de manière pérenne. Pour le gestionnaire, le souci de conservation des Chiroptères passe donc par une planification de la gestion susceptible de satisfaire leurs exigences écologiques sur le long terme à l'échelle de la forêt. L'aménagement forestier (ou le plan simple de gestion en forêt privée) est le meilleur outil pour cela.

Encore faut-il pouvoir caractériser ces exigences et les niveaux d'enjeu d'une façon qui soit « interprétable » en termes de gestion et qui contribue efficacement au processus de décisions d'aménagement. Cela nécessite un grand nombre de données, concernant si possible plusieurs espèces, avec des informations sur la distribution, les densités d'utilisation de l'espace, les relations entre les habitats disponibles et les espèces tant pour les gîtes que les terrains de chasse et encore sur le type de corridors utilisés. Or, actuellement, rares sont en France les forêts pour lesquelles on dispose de telles connaissances, car les études n'ont vraiment débuté qu'après 2000 et consistent surtout en inventaires simples et quelques travaux ponctuels sur telle ou telle espèce (Tillon 2014).

La forêt domaniale de Rambouillet est l'une des exceptions où diverses études ont permis d'accumuler des informations suffisamment riches pour se prêter désormais à l'exercice. Dans la mesure où aucun autre taxon occupant principalement des habitats forestiers ne permet une telle approche, cette situation désigne tout naturellement les Chiroptères pour incarner la composante biodiversité dans les réflexions et les choix d'aménagement.

Pourquoi la forêt de Rambouillet?

Une grande chênaie de plaine à enjeux multiples...

Forêt domaniale de 13 740 ha, elle est au cœur d'un massif de plus de 22 000 ha et se présente en plusieurs entités de plus de 1 000 ha d'un seul tenant chacune, bordées ou entrecoupées de boisements privés. Des axes de circulation la traversent et peuvent bloquer les échanges d'espèces entre certains secteurs : la nationale N10 et la voie ferrée pour les plus importantes. Forêt de chênes essentiellement (≈73 %), mais aussi de pins sylvestres et laricio (≈20 %, introduits surtout après la seconde guerre mondiale dans des parcelles ruinées sur stations difficiles), les peuplements caractéristiques sont des taillis-sousfutaies âgés relativement pauvres en réserves sur des stations en mosaïque. Les potentialités de sols sont variées : alors que les stations de type chênaiecharmaie offrent des possibilités en production de bois d'œuvre de qualité, les stations les plus acidiphiles à fougère ou à molinie remettent en question la pérennité même des boisements et la présence du chêne.

À 40 km de Paris, la forêt de Rambouillet est dite périurbaine : emblématique, elle reçoit quelque 11 millions de visites par an et présente à la fois des secteurs « phare », qui concentrent les visiteurs, et des secteurs « cœurs de massif » à fréquentation diffuse. La qualité de vie locale en est fortement dépendante et les habitants sont très attentifs à sa gestion. Elle fait par ailleurs l'objet de sites classés et

de sites inscrits au titre du paysage. L'ensemble du massif est classé forêt de protection pour le préserver de la pression d'urbanisation francilienne, à la fois pour la biodiversité et pour le bien-être de la population.

La forêt représente enfin un enjeu écologique important, attesté par les divers classements réglementaires qui s'y appliquent et conforté par de nombreux inventaires et diagnostics naturalistes, grâce notamment à l'action du comité scientifique de Rambouillet.

... bénéficiant de mesures diverses de protection de la biodiversité...

Ces inventaires ont contribué à définir les divers zonages destinés à protéger les milieux exceptionnels et, plus largement, la biodiversité. Ainsi, plusieurs Réserves Biologiques Dirigées (RBD) ont été créées à partir de 1986 et positionnées sur l'ensemble des habitats de landes et pelouses, les habitats humides ainsi que des vieux peuplements, pour un total de 1120 ha. Plus récemment, deux Réserves Biologiques Intégrales ont aussi vu le jour (204 ha), essentiellement dans la chênaie humide à molinie, et un réseau d'îlots de vieux bois a été élaboré afin de conserver des habitats de vieux bois et bois morts en faveur de la faune et de la flore qui y sont inféodés. Conçu selon un maillage de l'ordre du kilomètre, en intégrant les données naturalistes disponibles, ce réseau totalise 159 ha d'îlots de sénescence (plus aucune action sylvicole) et 396 ha d'îlots de vieillissement (les chênes y sont menés jusqu'à deux fois leur âge d'exploitabilité normal), le tout devant assurer des relais temporels et spatiaux à l'ensemble des espèces saproxyliques à l'échelle de toute la forêt.

... où le renouvellement des vieilles chênaies relance la réflexion d'aménagement

Ces dispositions sont pleinement intégrées dans l'aménagement en vigueur, arrêté pour la période 2005-2025, la forêt étant par ailleurs principalement traitée en futaie régulière. Le bilan d'application dressé au bout de 5 ans et de fortes contestations des coupes de régénération de grande surface ont cependant conduit à refaire un état des lieux des peuplements de chênes les plus âgés, afin de revoir les contours du groupe de régénération et d'envisager une sylviculture irrégulière quand les caractéristiques dendrométriques et stationnelles s'y prêtent. À savoir : structures hétérogènes, stations défavorables à la régénération par coupe rase ou même progressive, ou encore le mélange d'essences. Ce modificatif d'aménagement a été l'occasion de proposer une méthode de prise en compte de la biodiversité saproxylique basée sur les données de Chiroptères, particulièrement riches sur le massif. Prise en compte qui ne devait pas grever les objectifs de production en volume de bois, ni entraver la gestion quotidienne de terrain (par multiplication d'entités mal délimitées).

La méthode repose sur l'élaboration d'une carte d'enjeux pour les Chiroptères, qui aide à construire les décisions d'aménagement. Il est rapidement apparu que la conservation des différentes populations sur l'ensemble du massif sur le long terme impliquait une réflexion globale non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. Ce constat vaut aussi pour l'enjeu paysager, également très fort ici. La réflexion porte donc sur trois périodes d'aménagement : les 10 ans correspondant au modificatif de l'aménagement actuel, et la durée d'application supposée des deux révisions qui suivront, soit deux fois 20 ans.

Construction de la méthode : les données de base

Pour construire une carte forestière des enjeux pour les Chiroptères, et asseoir les raisonnements conduisant aux décisions d'aménagement, nous avions besoin non seulement de données naturalistes mais aussi de données sur les peuplements: le nouvel état des lieux des vieilles chênaies nous en a fourni l'opportunité. Avec

un niveau de détail justifié ici par l'acuité des enjeux et exigences diverses mais qui, d'une façon générale, est rarement disponible et pas forcément nécessaire.

Inventaire des peuplements et constat sylvicole

Un protocole de description des vieilles futaies a été mis en place sur les contours du groupe de régénération et du dernier groupe d'amélioration (anciennement groupe de préparation) de l'aménagement de 2005, pour une surface totale inventoriée de 3400 ha. La description se fait selon un maillage systématique de 4 placettes à l'hectare, réduit à 2 placettes à l'hectare dans les peuplements les plus homogènes. Si bien qu'il est possible à l'échelle de la parcelle de délimiter des entités de structure homogène avec précision.

Pour chaque placette on dispose des informations suivantes: inventaire des 12 arbres les plus proches du centre de la placette, répartis par essence et par catégorie de diamètre, mesure de la surface terrière des essences de production, du taillis et des essences d'accompagnement, indication de la station selon les grands types principaux rencontrés à Rambouillet, relevé de la dynamique de végétation et des données sur le renouvellement présent. À quoi s'ajoutent des composantes écologiques (arbres à microhabitats, milieux spécifiques, bois mort...), et des composantes paysagères (sensibilité particulière, chemin ou équipement, lisière...).

Ces données précises ont permis d'identifier les peuplements répondant aux critères d'une possible sylviculture irrégulière. Mais l'inventaire confirme par ailleurs le constat de 2005 en mettant en évidence 1 467 ha de vieilles chênaies régularisées en gros bois et très gros bois, souvent par parcelles entières, qu'il faudrait régénérer. Cependant, il paraît possible d'étaler l'effort dans le temps et de les renouveler progressivement sur maximum 50 ans.

Liste des travaux sur les Chiroptères en forêt de Rambouillet

• Programme de suivi de l'activité des Chiroptères sur certains secteurs de la forêt domaniale de Rambouillet, en lien avec la gestion mise en œuvre (période 1999-2002) (Tillon 2002)

Plusieurs sites ont été suivis par détection ultrasonore dans l'objectif de caractériser l'activité de chasse des chauves-souris dans différents types d'habitats forestiers, entre les stades les plus jeunes (fourrés) et les vieilles futaies de chêne.

• Programme d'étude de la réaction des Chiroptères après la tempête de 1999 (Tillon 2001, 2004)

L'un des sites d'étude du programme précédent a été fortement touché par la tempête du 26 décembre 1999, la moitié du site étant intégralement détruite. Un suivi d'activité a été mis en place visant à évaluer l'impact de cet événement, principalement sur l'activité alimentaire des différentes espèces. Juste après exploitation, les pins stockés sur place de dépôt ont d'abord été colonisés par des insectes comme les Scolytes (en grands nombres) et leurs prédateurs et parasites, attirant chaque soir de nombreux individus de plusieurs espèces de Chiroptères qui les ont consommés en grandes quantités (jouant un rôle régulateur). Néanmoins, la chute de plusieurs vieux peuplements feuillus a probablement détruit certaines colonies, expliquant la baisse d'activité globale les deux premières années de suivi.

• Étude des Chiroptères dans les arbres (Tillon 2005)

Ce programme (2002-2004) visait à identifier les gîtes types utilisés par l'ensemble du cortège de Chiroptères utilisant la forêt. L'objectif final était de fournir au gestionnaire marteleur un modèle d'arbres-type à conserver pour ces espèces, mais aussi de proposer les catégories d'arbres inintéressants pour les chauves-souris, pouvant être exploités sans risque pour la conservation des gîtes indispensables. Ainsi, 3 942 arbres ont été décrits sur six secteurs de 4 à 10 ha, et les 565 cavités visibles du sol visitées pour regarder la proportion des cavités utilisées, toutes espèces confondues. Une typologie a pu être définie, les cavités types étant des trous de pic et des fissures étroites les plus hautes possible sur des arbres (essentiellement des chênes, même quand d'autres essences étaient disponibles) principalement sains et de gros diamètres (et dominants), à moins de 30 m d'un gros arbre mort. Plusieurs colonies de reproduction de plusieurs espèces ont été trouvées grâce à ce programme.

• Projet RESINE (Représentations Sociales et Intérêt écologique de la NEcromasse)

Une étude a été coordonnée par Irstea (de 2007 à 2008) dans l'objectif de comprendre les liens entre le bois mort et certains groupes taxonomiques. Les Chiroptères ont ainsi été observés par points d'écoute sur 30 placettes dont le volume de bois mort s'étalait de 0 à 120 m³ à l'hectare (entre les bois morts debout et au sol).

• Projet GNB (Gestion, Naturalité, Biodiversité)

Ce programme, co-construit par l'ONF et Irstea, coordonné par Irstea, visait à comparer la biodiversité des peuplements exploités avec celle des peuplements non exploités (en réserve biologique), sur différentes forêts en France. Plusieurs points d'observation ont ainsi été installés en forêt de Rambouillet en 2012. Les données issues de ce programme ont été ajoutées à

celles du programme RESINE pour renforcer les analyses sur les relations entre les Chiroptères et le bois mort (Tillon 2015).

• Thèse de doctorat sur les relations entre les Chiroptères et la matrice forestière (et la gestion forestière)

Cette étude a été menée de 2006 à 2009 (terrain) sur divers secteurs de la forêt, en équipant de dispositifs de localisation plusieurs individus de plusieurs espèces, principalement *Myotis bechsteinii*, *M. nattereri* et *Plecotus auritus*. Ainsi, des milliers de localisations ont été récoltées, permettant d'identifier les réseaux d'arbres gîtes, les terrains de chasse et les corridors empruntés (avec parfois près de 280 arbres différents utilisés par une seule colonie de 150 à 200 individus de *M. bechsteinii* sur 800 à 1 000 ha).

• « État zéro » de la biodiversité des îlots de vieux bois

Compte-tenu de la stratégie mise en place pour conserver des vieux bois en forêt de Rambouillet, plusieurs réseaux d'îlots de vieux bois, choisis aux abords d'une grande réserve biologique ou dans des secteurs concentrant des exploitations la même année, ont été inventoriés (ainsi que des peuplements voisins) de 2011 à 2014, afin de dresser un état zéro de ces sites dont l'environnement va évoluer au cours du temps. Notamment, plusieurs unités de gestion voisines de quelques îlots ont fait l'objet d'exploitation le même hiver. Il s'agit donc d'alimenter les connaissances sur le lien entre la biodiversité et la forêt. Ce programme s'inscrit sur la durée, seuls les Chiroptères ont été étudiés.

• Données opportunistes

Enfin, plusieurs observations ont été réalisées, de manière opportuniste ou organisée, sur des sites ponctuels, comme des bâtiments forestiers, des gîtes artificiels ou des ouvrages d'art, principalement pour compléter les informations relatives à la distribution des espèces sur le massif.



Suivi nocturne par détection ultrasonore

Espèce	Année	Type de gîte		Terrains	Statut de	
	de découverte	Hivernal (1)	Estival (2)	de chasse (3)	l'espèce (4)	
Grand rhinolophe Rhinolophus ferrumequinum	2006	G	Н	B, L, PO, V, FR	TR	
Petit rhinolophe Rhinolophus hipposideros	2004	G, H	Н	FA, FF, B, J, CE	TR	
Murin de Bechstein Myotis bechsteinii	1999	A, G	А	FA, FF, FR, L, PE	С	
Murin de Brandt Myotis brandtii	2008	G, A	H, A	B, J, L, FF, BL	AR	
Murin d'Alcathoe Myotis alcathoe	2002	G, A	A, H	FF, J, FM, V	R	
Murin de Daubenton Myotis daubentonii	1999	G, A	A, H	FF, FA, B, PE, J, V	AR	
Murin à oreilles échancrées Myotis emarginatus	2003	G	Н	FF, FM, FR	AR	
Grand murin Myotis myotis	1999	G	Н	FF, V, L	AR	
Murin à moustaches Myotis mystacinus	1999	G, A	A, H	F, L, BL, PO	AR	
Murin de Natterer Myotis nattererii	1999	G, A	A, H	FF, FR, L, V, J	С	
Noctule de Leisler Nyctalus leisleri	2000	A, G	A, H	FF, FR, L, V	AR	
Noctule commune Nyctalus noctula	1999	A, G	A, H	J, V, PE, B, F, L, BL	С	
Sérotine commune Eptesicus serotinus	1999	H, (A, G)	H, A	F	С	
Pipistrelle de Kuhl Pipistrellus kuhlii	2003	H, A, G	H, A	V, J, F	С	
Pipistrelle de Nathusius Pipistrellus nathusii	1999	A, H	A, H	FF, FR, FM, L, PE	AR	
Pipistrelle commune Pipistrellus pipistrellus	1999	H, A, G	H, A	J, B, PE, PO, F, CE, L	TC	
Pipistrelle pygmée Pipistrellus pygmaeus	2003	H, A	H, A	Idem <i>P. pipistrellus</i> mais plus forestière		
Barbastelle d'Europe Barbastella barbastellus	1999	A, G	A, H	PE, FF, FA	TR	
Oreillard roux Plecotus auritus	1999	A, G	A, H	FF, FR, PO, V, J	TC	
Oreillard gris Plecotus austriacus	1999	H, G, A	H, A	V, J, B, PO, FF	AR	

Tab. 1 : statut des espèces rambolitaines de chauves-souris, sur la période 1999-2014

- (1) Gîte hivernal : G = grotte ou cavité souterraine, H = habitation humaine, A = arbre
- (2) Gîte estival : H = habitation humaine, A = arbre
- (3) Terrains de chasse : B = bocage, BL = boisement linéaire, CE = culture extensive, F = forêt, FA = forêt alluviale, FF= forêt feuillue, FM = forêt mixte, FR = forêt résineuse, J = jardin,
- L = lisière forestière, PE = plan d'eau, PO = paysages semi-ouverts, V = village
- (4) Statut de l'espèce, estimé à dire d'expert pour classer les espèces selon leur degré de rareté dans cette forêt : TC = très commun, C = commun, AR = assez rare, R = rare, TR = très rare

L'étude des Chiroptères : plusieurs programmes d'inventaire

Depuis 1998, de nombreuses études concernant les Chiroptères ont été conduites sur divers secteurs de la forêt de Rambouillet, et en visant des objectifs différents (voir encadré), ce qui a permis de rassembler une information très riche et parfois très fine sur les relations entre les espèces et les habitats forestiers. Ces observations donnent des indications précises sur les habitats favorables et sur les impacts (positifs ou négatifs) de certaines actions de gestion; ce faisant, elles permettent d'extrapoler aux secteurs du massif qui n'ont pas bénéficié de ces études.

Lors d'une première synthèse, nous avons pu établir la liste et le statut (en terme de rareté ou non) des différentes espèces utilisant la forêt de Rambouillet (Tillon, 2007); la forêt compte aujourd'hui vingt espèces. Par ailleurs, toutes les données de ces programmes de recherche répondent au format indispensable pour intégrer une base de données spatialisées : auteur, date, espèce et localisation (coordonnées X et Y), mais aussi d'autres informations obtenues selon le protocole utilisé, sur le niveau d'activité des espèces, sur les gîtes ou encore sur le statut des individus. Au total, ce sont environ 10 000 données accumulées qui ont été intégrées à la Base de Données Naturalistes (BDN) de l'ONF au fur et à mesure des résultats obtenus. Le tableau 1 propose une synthèse des connaissances sur le statut des 20 espèces recensées dans les diverses études et les habitats qu'elles exploitent.



Oreillard roux

Construction de la carte des enjeux pour les Chiroptères

La carte des enjeux Chiroptères (figure 1) est bâtie sur les données disponibles dans BDN, intégrées dans le SIG de la forêt et permettant d'identifier les sites d'intérêt avéré.

Structures forestières et Chiroptères

Il faut d'abord distinguer deux groupes d'espèces aux exigences sensiblement différentes, le groupe des glaneuses et celui des espèces de lisière :

- les espèces dites glaneuses (genres Rhinolophus, Myotis et Plecotus) ont un comportement alimentaire qui consiste à rechercher leurs proies dans le feuillage par vol lent ou stationnaire, voire à les glaner sur les feuilles des arbres après les avoir identifiées précisément; beaucoup d'entre elles ont un système d'écholocation suffisamment performant pour identifier le type de proie, au point de différencier certaines familles de chenilles (Lépidoptères). Ces espèces sont très dépendantes du feuillage donc de la forêt (Barataud, 2012; Müller et al., 2012; Plank et al., 2012).
- Inversement, les espèces dites de lisière (genres Pipistrellus, Eptesicus, Nyctalus et Barbastella) ne sont pas capables de vol stationnaire, et se déplacent en permanence pour attraper leurs proies en vol. Elles ont toutes (ou presque) besoin de repères boisés mais aussi d'espaces de vol dégagés pour se disperser et chasser. Ainsi, elles sont donc liées aux lisières forestières internes et externes, d'où leur catégorie (Barataud, 2012; Müller et al., 2012; Plank *et al.*, 2012). Beaucoup sont dépendantes de la forêt pour gîter et chasser.

Si l'habitat forestier de prédilection des Chiroptères pour les gîtes est la chênaie adulte à âgée, pour sa richesse en fissures, cavités et autres micro-habitats, les territoires de chasse et plus généralement de déplacement sont plus variés.

Dans les peuplements feuillus, la

structure et la diversité en essences

importent. Selon les espèces, les

déplacements se font au sol, dans la végétation du sous-bois, dans les houppiers... toutes les strates verticales doivent être représentées, et des grands arbres toujours présents. Pour sa part, la richesse en essences favorise une production diversifiée d'insectes aux émergences échelonnées dans le temps. Les peuplements feuillus trop jeunes ne permettent pas d'assurer des corridors de déplacement pour beaucoup d'espèces : c'est seulement à partir des premiers stades de futaie feuillue adulte qu'on a la structure verticale de la végétation et les cavités favorables (qui mettent du temps à se constituer en nombre suffisant pour une colonie) permettant de retrouver ces espèces (essentiellement les glaneuses), soit une futaie d'environ 70-80 ans minimum pour la plupart des essences forestières.

Les peuplements résineux, quant à eux, sont très peu attractifs mais le mélange chêne-pin peut être favorable.

La carte des enjeux

Compte tenu des connaissances issues des programmes d'inventaire sur certains secteurs de la forêt, mais aussi des connaissances sur l'écologie des espèces, nous avons pu définir les bases d'une cartographie des enjeux pour les Chiroptères. Tout d'abord, les différents inventaires ont révélé des zones particulièrement favorables où se concentrent les espèces de l'un ou l'autre groupe (glaneuses ou de lisière, voire les deux), et que nous considérons comme zones cœur prioritaires. De même, nous avons pu identifier :

 les corridors de déplacement avérés (corridors observés lors de certaines études dédiées);

- les corridors de déplacement potentiels au vu des peuplements (peuplements adultes avec un sous-étage dense permettant d'assurer les relais réguliers pour que ces espèces utilisant un sonar puissent progresser à l'aide de repères acoustiques, Tillon, 2015);
- les barrières à la dispersion des espèces (peuplements mono spécifiques résineux, jeunes peuplements feuillus, milieux exclusivement ouverts, infrastructures routières...).

Selon cette base désormais bien documentée, nous avons pu étendre le principe aux autres secteurs du massif, à partir de la carte des peuplements et de la photo aérienne (notamment pour les parties privées), et en se projetant sur trois périodes d'aménagement, c'està-dire à l'horizon de 50 ans, pour appréhender les questions de continuité temporelle.

Construite pour fournir les indications nécessaires à l'aménagiste, cette carte des enjeux (figure 1) :

- classe les parcelles par niveau d'enjeu, à dire d'expert : l'enjeu fort concerne de grands secteurs composés de vieux peuplements structurés que l'on sait favorables, souvent en mosaïque avec des habitats d'intérêt particulier (milieux humides ou ouverts), tandis que l'enjeu moyen peut concerner des secteurs favorables de surface plus réduite ou des peuplements moins structurés, ou encore qui seront favorables dans 50 ans maximum au milieu d'un secteur peu propice;
- identifie les zones cœurs prioritaires qui requièrent une vigilance particulière pour conserver sur le long terme le potentiel d'accueil en habitats favorables (vieux peuplements feuillus stratifiés en particulier);
- s'appuie autant que possible sur les réserves biologiques et îlots de vieux bois déjà en place (réseau de vieux bois durable au-delà de

notre échéance) pour identifier des blocs d'habitats favorables sur plusieurs hectares voire dizaines d'hectares et tracer des continuités écologiques théoriques entre zones favorables;

- signale (traits marron) les barrières aux déplacements et aux échanges d'individus entre colonies, liées à des résineux ou des feuillus trop jeunes pour devenir favorables à l'échéance de 50 ans;
- situe les corridors écologiques théoriques actuels, qu'ils soient internes à la domaniale (en rouge) ou fassent le lien avec des boisements privés (en vert), et révèle ceux qui sont aujourd'hui uniques entre deux entités du massif;
- signale enfin les corridors futurs à l'horizon de 50 ans (en pointillé noir), constitués de jeunes futaies de chêne qui auront alors suffisamment grandi (elles auront au moins 70 ans) pour présenter les qualités nécessaires.

Des nœuds essentiels au réseau d'habitats favorables sont identifiés en jaune, ils sont souvent accolés à des parcelles qui ont été régénérées et constituent un point de jonction indispensable aux continuités écologiques, parfois seulement constitués de quelques vieux chênes sur un carrefour ou le long d'une allée.

Prise en compte dans les décisions d'aménagement

Il ressort de cette analyse que le renouvellement des vieilles chênaies peut affecter les populations de deux façons : d'une part en diminuant la surface d'habitat favorable dans certains secteurs, d'autre part en altérant les possibilités d'échanges de population entre les secteurs.

L'objectif recherché a donc été de concilier le renouvellement des peuplements avec le maintien d'un réseau d'habitats favorables reliés entre eux: tout d'abord en limitant la surface des régénérations d'un seul tenant (avec un minimum de 2 ha), mais aussi en choisissant la forme et l'emplacement précis de ces régénérations pour que les corridors soient toujours assurés. Le tout en respectant un effort global de renouvellement suffisant pour une gestion durable, garantissant ainsi pour le futur la présence continue d'habitat favorable.

À cette fin, les entités à renouveler sont définies pour les 10 ans d'application du modificatif d'aménagement, mais aussi identifiées dans leurs contours théoriques pour les 40 années qui suivront. Il s'agit en effet de proposer des solutions de long terme qui ne conduisent pas les futurs gestionnaires vers une impasse sylvicole ou écologique, de préconiser des mesures durables qui n'obèrent pas les objectifs probables des futurs aménagements. Notamment, nous nous sommes attachés à limiter autant que possible les contraintes de gestion, et à ne pas réduire les volumes de bois à sortir de la forêt.

Des solutions diverses selon les contextes

Il est des secteurs où le classement en régénération selon les critères sylvicoles habituels ne pose pas de problème vis-à-vis de l'enjeu Chiroptères, notamment lorsque l'entité concernée n'est ni une zone prioritaire ni un corridor, ou lorsqu'elle est au milieu d'un secteur à conduire en futaie irrégulière. Mais pour un certain nombre de cas, il a fallu adapter les choix pour permettre la préservation des populations de chauves-souris.

Les solutions adoptées sont multiples, en fonction de chaque contexte et dans la mesure des connaissances actuelles. D'autant que se superpose à cette réflexion l'enjeu paysager, très important pour le massif de Rambouillet et qui est source des mêmes problématiques : assurer aux générations actuelles et futures des paysages de chênes adultes bien répartis mais non figés. Selon les cas, les enjeux paysager et écologique vont de pair ou non, parfois le découpage paysager supposé idéal des coupes de régénération constituerait une barrière aux chauves-souris.

Les trois exemples suivants illustrent un certain nombre de compromis trouvés (les légendes complètes des cartes sont données en annexe p. 63).

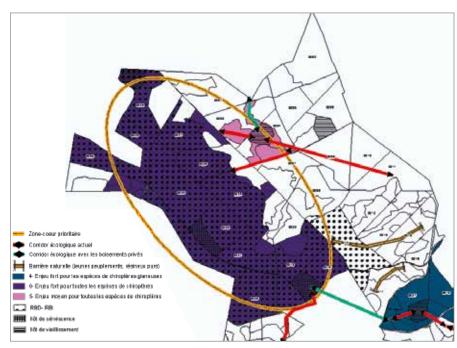
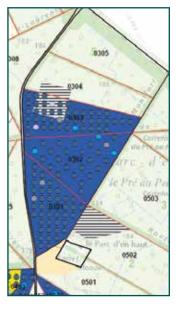


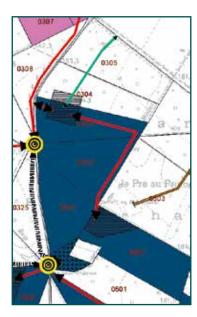
Fig. 1 : extrait de carte des enjeux Chiroptères, 2^e division

Exemple 1 : parcelles homogènes en chênes vieillissants régularisés gros bois - très gros bois

Localisation: Carrefour des Voleurs, 3e division, parcelles n° 03.01, 03.02 et 03.03







ENJEUX PAYSAGERS

ENJEUX SYLVICOLES

ENJEUX ÉCOLOGIQUES

- Contexte paysager –Les trois parcelles concernées jouxtent une route départementale passante (en rose); un axe piéton très fréquenté fait la limite entre les parcelles 03.01 et 03.02 (en violet). Le carrefour des Voleurs en lui-même est emblématique.
- Contexte sylvicole L'ensemble de ces peuplements est homogène, ce sont des gros bois très gros bois de chênes arrivés à maturité, sur un total de 40 ha.
- Contexte écologique Dans un secteur fortement rajeuni, ces trois parcelles sont particulièrement favorables aux chauves-souris (glaneuses), leurs vieux chênes offrent une grande quantité d'arbres à cavités. En outre, elles constituent un corridor nord-sud unique : à l'est le gaulis de chênes ne deviendra favorable que dans 70 à 80 ans, à l'ouest la jeune futaie ne pourra constituer le futur corridor (en pointillés sur la carte) que dans 40 à 50 ans. Deux points de jonction essentiels au réseau sont identifiés (cibles jaunes).

Cet exemple illustre une situation très courante : ensemble de parcelles contiguës aux peuplements matures et homogènes, formant dans une zone défavorable un corridor entre vieux peuplements.

DÉCISION D'AMÉNAGEMENT

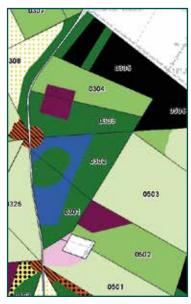
La confrontation des enjeux sylvicoles, paysagers et écologiques conduit à échelonner sur 50 ans la régénération de ces trois parcelles. La surface prévue en régénération pour le modificatif d'aménagement sur les 10 prochaines années est donc de 10 ha seulement (en bleu).

D'un point de vue paysager, la route départementale ne longera la coupe que sur deux tronçons de 100 et 200 m, avec une profondeur de vue de 200 m maximum. Les piétons traverseront la coupe sur 2 tronçons de moins de 100 m chacun.

D'un point de vue écologique, l'objectif est de garder un continuum de chênaie adulte entre les deux îlots de vieillissement (en violet) pour conserver le corridor nord-sud. Pour les 10 ans qui viennent, la partie régénérée évite toute coupure, cependant il faudra dans les aménagements suivants, et au moins pour les 50 prochaines années, garder une partie du peuplement à l'est des parcelles 03.02 et 03.03. Dans 50 ans, la parcelle 03.25 (à l'ouest) pourra prendre le relais. L'est de la parcelle 03.01 et l'ouest de la parcelle 03.03 pourront être régénérés dans 30 ans.

Il faut admettre que ce compromis ajoute une difficulté à la gestion, pour délimiter les entités sur le terrain. Mais la vision du promeneur depuis les routes et sentiers, et l'organisation de l'espace nécessaire aux espèces, obligent ici à s'affranchir du parcellaire forestier. Dans la mesure du possible, nous nous sommes attachés à utiliser des limites physiques; dans le cas présent la limite est s'appuie sur un fossé existant.

AMÉNAGEMENT

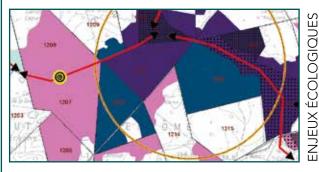


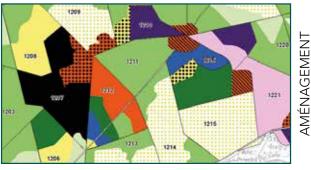
Exemple 2 : parcelles de peuplements en mosaïque et corridor unique

Localisation: Petit Étang Neuf, 12e division, parcelle 12.16 et alentours









- Contexte paysager –La parcelle 12.16 borde le Petit Étang Neuf (en rouge), prisé des promeneurs qui empruntent la route et le carrefour nord de la parcelle (en violet), ainsi que des itinéraires piétons rejoignant un autre site touristique (vers le sud-ouest).
- Contexte sylvicole la parcelle 12.16 est régularisée en très gros bois mais, plus à l'ouest, l'inventaire révèle une hétérogénéité des diamètres (pastilles de couleurs différentes) pour toutes les surfaces représentées en rose; les parcelles 12.07 et 12.08 sont en cours de régénération (fond noir).
- Contexte écologique –La parcelle 12.16 est identifiée comme une zone cœur prioritaire présentant de nombreux gîtes, et les milieux du Petit Étang Neuf (classé en RBD) rendent la zone très favorable pour toutes les espèces. L'ensemble feuillu est un corridor unique est-ouest reliant la vallée de la Guesle (à l'est) au reste du massif ouest. Des résineux ou des jeunes peuplements feuillus entourent ce secteur.

DÉCISION D'AMÉNAGEMENT

Sur les 17,4 ha de la parcelle 12.16 seuls 4 ha seront régénérés dans les 10 ans qui viennent (en bleu), de façon à échelonner au maximum le renouvellement de la parcelle.

Vers l'ouest, la partie de la parcelle 12.12 hétérogène en diamètre est classée en futaie irrégulière eu égard à ses caractéristiques dendrométriques et stationnelles (en orange uni). Mais sur les parcelles 12.07 et 12.08, les vieux chênes du carrefour de la Licorne sont classés en futaie irrégulière pour raison écologique (en orange à points noirs), malgré leur structure dendrométrique régularisée, pour assurer la pérennité de l'unique corridor est-ouest lorsque le renouvellement du reste de ces parcelles sera terminé.

À noter que ce choix du traitement irrégulier, dérogatoire aux recommandations sylvicoles (structure de peuplement, station), est strictement réservé aux blocages de ce type, d'ordre écologique ou paysager. Ainsi, le carrefour emblématique du Petit Étang Neuf est lui-même en irrégulier pour ménager l'esthétique du lieu (orange à rayures): la structure va varier et le paysage se modifier mais il restera toujours des chênes d'âge adulte, diffus autour du carrefour. La structure irrégulière engendrée ne permettra peut-être pas de trouver des gîtes à Chiroptères dans un premier temps, puisque des vieux chênes y seront prélevés lors des éclaircies, mais elle assurera au moins un corridor de déplacement ainsi que des habitats de chasse pour les espèces glaneuses (toujours quelques arbres adultes, toutes strates de végétation verticale).

Cet exemple illustre les trois cas amenant au choix de l'irrégulier dans ce modificatif d'aménagement.

Par ailleurs, l'inventaire identifie des peuplements « ruinés » (moins de 10 m²/ha en essences de production), qui justifient une reconstitution par plantation; des chênes dispersés sur stations difficiles pour la plupart (acidiphiles à molinie ou à fougère aigle), auxquels on substituera du pin. Pour les 10 ans qui viennent, l'effort de plantation concernera la moitié de ces peuplements. Ceux qui présentent un intérêt certain pour les Chiroptères sont mis en « attente pour raison écologique » (jaune à points noirs). Cet enjeu écologique actuel confronté à l'enjeu de production limité de ces peuplements très pauvres sur stations ingrates, justifie de surseoir à la transformation par plantation résineuse; le massif compte assez de surfaces ruinées pour que l'effort de plantation défini par l'aménagement puisse se porter ailleurs. Ces parcelles « à planter » seront résorbées au fur et à mesure des aménagements et des possibilités de plantation, en priorisant celles qui sont le moins utilisées par les Chiroptères.

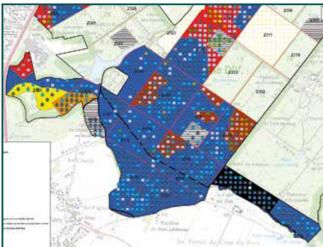


Exemple 3 : secteur à grande échelle, homogène en chênes vieillissants gros bois – très gros bois, sans donnée naturaliste particulière

Localisation: 23e division, autour de l'Étang d'Or

Ce dernier exemple montre, à plus grande échelle, comment on peut intégrer les enjeux Chiroptères aux choix d'aménagement lorsque l'on dispose de très peu de données espèces. Il est par ailleurs représentatif de trois grands secteurs de la forêt domaniale identifiés comme excessivement vieillis et dépourvus de jeunes peuplements susceptibles de prendre la relève.





ENJEUX PAYSAGERS

ENJEUX SYLVICOLES

• Le paysage local se structure par l'Étang d'Or à l'est (en rouge), et l'Espace Rambouillet à l'ouest, notamment composé de vieux chênes. Au sud la forêt est en lisière avec la plaine.

La fréquentation est importante sur les pistes (en violet) et autour de l'étang (camping caravaning sur les berges).

• Les peuplements sont homogènes, 200 ha de chênaies vieillies où seules quelques petites zones répondent aux critères dendrométriques et stationnels d'une possible sylviculture irréqulière (fond rouge ou marron).

Si la maturité sylvicole est générale, les placettes d'inventaire permettent de distinguer les peuplements tout juste matures des très gros bois, avec assez de détails pour décomposer les parcelles en plusieurs entités de maturité croissante.

Dernier élément d'ordre sylvicole : le renouvellement n'a quasiment pas été engagé sur le secteur, en raison d'un problème de desserte en cours de résolution aujourd'hui.

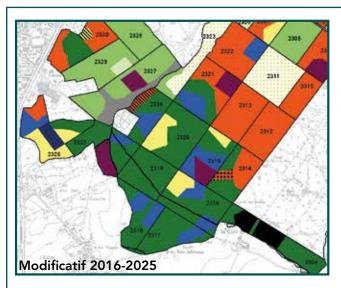
• Concernant les Chiroptères, nous n'avons pas assez de données sur ce secteur pour définir des zones prioritaires, mais la nature même des peuplements en fait des habitats potentiellement favorables sur toute la surface. Le secteur est aujourd'hui particulièrement propice à l'accueil de la faune saproxylique associée aux vieux bois et aux arbres morts, il s'agit donc de concevoir le renouvellement de façon à assurer la relève des habitats favorables dans le futur, sans mettre les populations en péril en agissant trop vite ou à des endroits critiques.

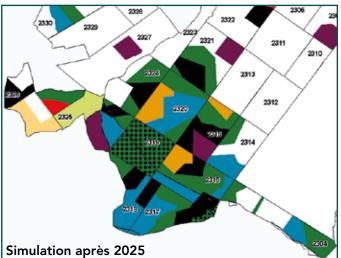
DÉCISION D'AMÉNAGEMENT (cartes page 63)

L'objectif a été de commencer le renouvellement le plus rapidement possible et tendre vers une mosaïque des classes d'âges répartie à l'échelle du canton, le minimum étant de régénérer le quart de ces peuplements dans les 10 ans qui viennent pour ne pas mener nos successeurs vers une impasse de gestion.

Renouveler des parcelles entières étant incompatible avec la fréquentation actuelle des promeneurs mais aussi des chauvessouris, nous avons réparti l'effort de régénération (soit ici 50 ha) en 10 unités de 2 à 10 ha chacune (en bleu), à échelonner sur les 10 ans, dont la forme s'affranchit des limites du parcellaire pour s'adapter aux diverses utilisation de l'espace (principalement les axes de circulation des promeneurs et une attention particulière sur les bords de l'étang).

À défaut de pouvoir nous appuyer sur des données de répartition des Chiroptères, nous avons misé sur l'idée de pérenniser un corridor reliant la zone de l'étang à l'Espace Rambouillet (et donc au reste du massif côté est). Compte tenu de l'impact probable de la réduction en 50 ans d'habitat favorable, une parcelle entière est laissée au-delà des 50 ans de durée de survie probable (parcelle 23.19 en vert à points noirs), cette mesure d'atténuation a été appliquée sur les trois secteurs les plus touchés par le renouvellement.



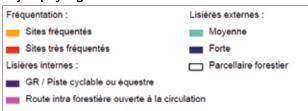


Pour le reste des unités de gestion, le découpage permet de simuler sur les deux aménagements qui suivront les entités théoriques qui pourront être renouvelées à leur tour (carte ci-contre) : après celles du modificatif (ici en noir), les contours théoriques de celles qu'on pourra régénérer dans les 20 ans de l'aménagement qui suivra (≈ 2026-2045, en bleu), puis dans les 20 ans de l'aménagement d'après (≈ 2046-2065, en vert uni).

En l'absence de données naturalistes réelles, le compromis trouvé est forcément plus théorique que dans les exemples précédents, mais raisonné à large échelle et à moyen terme, selon une stratégie « sans regret ». Cette stratégie consiste à fournir à la population locale de Chiroptères (même si on ne la connaît pas précisément) les moyens de s'adapter aux modifications futures de son environnement, en espérant que les mesures adoptées suffiront à ne pas la mettre en péril. Cette stratégie permettra en outre d'adapter la gestion aux évolutions constatées.

Annexe : Légendes complètes des cartes

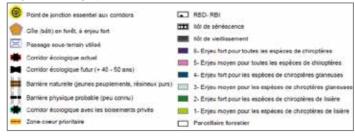
Enjeu paysager



Enjeu sylvicole



Enjeu écologique



Décision d'aménagement

	Jeune peuplement sans coupe	1	Futaie irrégulière pour raison paysagère
	Amélioration des jeunes futales		Futaie irrégulière pour raison écologique
	Amétoration des futaies adultes		Entité ouverte en régénération à termine
	Groupe A5 : demières améliorations des vieilles futales		Entité à ouvrir en régénération naturere
	Attente pour raison sylvicore		Peuplement ruiné à planter
1	Attente pour ratson paysagère		Réserve Biologique Dirigée
+	Attente pour raison écologique	•	Réserve Biologique Intégrale
	Zone boisée pauvre hors sylviculture		Groupe de reconstitution
	liốt de sénescence		Talls
	Bôt de vieillissement		Vide non boisable
	Futaie irrégulière pour raison sylvicole		Parcellaire forestier

Décision d'aménagement au-delà du modificatif d'aménagement de 10 ans (cf. Exemple 3)

п	
ı	A6 á régénérer dans le prochain aménagement (10 - 30 ans)
ı	A5 à régénérer dans l'aménagement encore suivant (30 - 50 ans)
ı	A5 balivage du taillis sous futaie ruinée, à planter éventuellement dans 50 à 70 ans
ı	A5 paysage - Arégénérer dans les 50 à 70 ans
ı	A6 écologie - A régénérer dans les 50 à 70 ans
ı	A ouvrir en régénération dans les 10 ans du modificatif

Le modificatif d'aménagement global 2016-2025

Au final, le modificatif d'aménagement répond à l'objectif de mener le renouvellement des vieilles chênaies en cohérence avec les enjeux écologiques et paysagers. Avec les deux outils/ résultats les plus attendus : atténuer le « choc » des coupes de régénération (réduction des surfaces élémentaires, dessin des contours) et conduire en futaie irrégulière les vieilles chênaies qui s'avèrent « éligibles » à ce traitement. Globalement, le groupe de futaie irrégulière (FIR), à renouvellement diffus, passe ainsi de 190 ha à 1389 ha et l'effort de renouvellement (surfacique) de futaie régulière s'en trouve donc fortement diminué. Par ailleurs, l'interprétation du diagnostic sylvicole a permis de mieux cerner les priorités, par entités de peuplement plus fines que précédemment, et de raisonner en termes de contrainte de vieillissement. On considère que, sur les 1467 ha de chênaies régularisées en gros et très gros bois à renouveler, certaines pourront encore tenir 50 ans. Ainsi la contrainte de vieillissement sur ces peuplements (auxquels s'ajoutent les peuplements ruinés à planter) est de 427 ha pour les 10 ans du modificatif, ce qui conduit à dimensionner le groupe de régénération à 450 ha. Le « surplus » est classé, selon la consistance du capital sur pied en A5 (dernier groupe d'amélioration) ou AMES (attente sans coupe).

Ajoutons que le modificatif a été l'occasion de préciser le sort des peuplements ruinés (324 ha). Il distingue ceux dont on peut transitoirement tirer un parti sylvicole (ex: taillis balivable) et décide, pour les autres, de n'en planter que la moitié (en pin ou en chêne, suivant les stations) et de classer l'autre moitié en groupe d'attente (pour statuer à l'aménagement suivant).

La prise en compte des Chiroptères s'inscrit dans ce dispositif général, en le déclinant localement selon les enjeux particuliers, comme on le voit au travers des 3 exemples.

Outre l'adaptation de la taille et de la forme des emprises de renouvellement, elle module les priorités (voire les critères de classement, cf. traitement irrégulier) d'une manière qui doit être « tracée » pour l'avenir. Ainsi on identifie dans le groupe A5 un sous-groupe « A5 écologie » de 135 ha correspondant aux unités de gestion - corridor écologique qui ne pourront pas être relayées dans ce rôle avant 50 ans (ou parcelle complète à maintenir 50 ans pour assurer un relai aux espèces dans un secteur particulièrement impacté par la régénération; cf. exemple 3). Les corridors écologiques uniques irremplaçables en 50 ans (et au-delà) sont quant à eux classés en futaie irrégulière et constituent un sousgroupe « IRR écologie » de 81 ha. En dépit de caractéristiques sylvicoles et stationnelles peu propices, une vraie sylviculture irrégulière y sera menée pour garantir leur pérennité, avec le renouvellement de vieux chênes, des éclaircies et des travaux dans les jeunes peuplements, actions nécessaires au maintien d'une structure stratifiée verticalement, favorable au déplacement des espèces.

De même, le groupe d'attente (AMES) comporte un sous-groupe « AMES écologie » correspondant aux 135 ha de futaies ruinées (moins de 10 m²/ha de vieux chênes avec micro-habitats, le plus souvent sur molinie ou fougère aigle) considérées comme particulièrement favorable aux Chiroptères et/ou assurant un corridor écologique, et qui ne peuvent donc pas être plantées (au moins pour partie) dans les 50 prochaines années (cf. exemple 2).

Enfin, les règles particulières de culture donnent des préconisations à plus petite échelle pour intégrer les autres espèces du cortège saproxylique, dont certaines sont beaucoup moins mobiles (Coléoptères). Ainsi on maintiendra, comme le prévoit l'instruction Biodiversité INS-09-T-71 de 2009, au moins un arbre sénescent ou mort et au moins deux arbres à micro-habitats à l'hectare. Dans les peuplements en

amélioration ou traités en irrégulier, ils seront simplement choisis au fur et à mesure de l'avancement des martelages et repérés à la peinture, sans recherche de regroupement particulier. Pour les unités de gestion à régénérer, en revanche, ces « arbres habitats » seront redéfinis lors de la désignation de la première coupe, avant même le relevé de couvert, en bouquets regroupés alliant des arbres à micro-habitats et d'autres potentiellement intéressants pour la biodiversité (vieux chênes), mais aussi répondant à des critères paysagers. Si par exemple l'unité de gestion régénérée fait 4 ha, alors il faut désigner un collectif de 8 arbres habitats.

L'intérêt est de protéger ces arbres habitats fragilisés par l'isolement et bien souvent abîmés lors des coupes progressives. En les regroupant, on limite la gêne pour les prochaines coupes et les travaux et on préserve des petits biotopes favorables pour des espèces peu mobiles. Cette proposition a été discutée avec les différents spécialistes naturalistes (Comité scientifique de Rambouillet) et les agents patrimoniaux responsables des coupes. Des arbres habitats sont aujourd'hui désignés de façon diffuse à l'occasion des éclaircies et « reconduits » d'un martelage à l'autre, y compris dans les quelques parcelles qui ont été ensuite ouvertes en régénération. À l'expérience, chacun admet pour des raisons différentes mais convergentes qu'il serait plus judicieux de rassembler ces effectifs d'arbres.

Discussion et perspectives méthodologiques

Les principes proposés ici pour la prise en compte de la biodiversité à l'échelle d'une grande forêt peuvent sembler inaccessibles, notamment parce qu'on dispose rarement d'information aussi fournie sur la biodiversité. Encore moins d'étude destinée à comprendre comment les populations d'espèces utilisent l'espace forestier. Pourtant, même sans données particulières,

il est possible de reproduire l'exercice sur la plupart des forêts à aménager, pour concilier les enjeux de production de bois et de maintien de la biodiversité. En nous appuyant sur des données abondantes pour certains secteurs, nous avons pu cerner des potentialités applicables sur l'ensemble du massif de Rambouillet mais aussi sur d'autres forêts, et qui permettent de dessiner une carte d'enjeux pour les Chiroptères avec cœurs d'habitats, corridors et barrières à la dispersion. Cela se fait simplement en repérant les habitats particulièrement favorables (chênaie vieillissante), des habitats barrière (résineux ou très jeune futaie) et des habitats favorables à échéance de 40 ou 50 ans, et en traçant des corridors de déplacement théoriques entre zones favorables, actuelles et futures.

Par ailleurs certains principes simples prévalent, particulièrement en traitement régulier, et sont applicables en l'absence de données naturalistes :

- La stratégie visant à maintenir quelques vieux peuplements (surtout des feuillus), une trame d'îlots de vieux bois, contribue à proposer des zones refuges pour les espèces saproxyliques. Il faut cependant que ces îlots soient suffisamment consistants pour convenir à des espèces comme les Chiroptères: 3 ha semble une surface adéquate pour leur permettre de trouver des gîtes (trous de pics et fissures sur arbres vivants) en nombre suffisant (Tillon, 2015).
- Le maintien d'un maillage de vieux arbres au sein des parcelles de production, pour la biodiversité arboricole, complète utilement cette stratégie.
- Il faut s'appliquer à raisonner en termes de connections nécessaires aux espèces qui dépendent des vieux stades ou des structures arborées, quitte à proposer des corridors (peuplements adultes, feuillus de préférence) dans lesquels on s'autorise à prélever des gros bois, mais en maintenant un état stratifié, sur une largeur

- à définir (selon les forêts et les contraintes locales de gestion). Cette mesure peut nécessiter le passage d'un traitement régulier à un traitement irrégulier.
- Enfin, le plus important est sans doute de maintenir une bonne répartition des classes d'âge entre les peuplements, pour offrir aux espèces la possibilité de « migrer » d'un secteur à un autre au fur et à mesure des régénérations. À l'échelle de cantons de 800 à 1 000 ha, correspondant à la surface régulièrement observée sur laquelle les colonies de reproduction de chauves-souris forestières exploitent leur réseau de gîtes (jusqu'à 300) et leurs habitats de chasse, l'expertise des peuplements doit s'affranchir des limites parcellaires pour assurer les continuités spatiales d'habitats dans le temps. La réflexion doit aussi se projeter au-delà d'un seul aménagement, pour anticiper la rotation des habitats favorables dans le temps. Rappelons que l'apparition des cavités nécessaires aux chauves-souris en forêt dépend du vieillissement des arbres (Otto 1998; Regnery et al. 2013; Larrieu et al. 2014). Ainsi, même si la régénération des vieux peuplements supprime des cavités, on peut assurer un roulement suffisant des gîtes possibles avec un bon équilibre des classes d'âge et un âge d'exploitabilité permettant la formation de nombreuses cavités. On suppose que les cavités com-

mencent à apparaître aux premiers stades de la futaie adulte, soit à environ 70 à 80 ans. Les quelques travaux menés sur ce thème (Tillon, 2015) suggèrent qu'un secteur doit être occupé sur au moins 30 % de sa surface par de la futaie adulte et plus, c'est-à-dire au-delà de 70-80 ans, pour qu'une colonie de reproduction de Chiroptères forestiers puisse y trouver des habitats favorables en quantité suffisante.

Il est probable que la simple application de ces grands principes aurait amené à construire pour la forêt de Rambouillet une carte des enjeux, puis la carte d'aménagement, avec un résultat assez proche de celui présenté ici. Encore fallait-il les établir et les valider en les confrontant aux observations et analyses naturalistes particulièrement riches sur cette forêt. Nous espérons maintenant que la stratégie proposée montrera son efficacité écologique, pour les Chiroptères et pour d'autres espèces, voire la plupart des espèces saproxyliques. Reste maintenant à mettre en place un dispositif de suivi permettant de s'en assurer.

Marie PARROT

Responsable aménagement ONF, Ag. Interdépartementale de Versailles marie.parrot@onf.fr (aujourd'hui : UT Garrigues à l'agence Hérault-Gard)

Laurent TILLON

Chargé de mission Faune Biodiversité et animateur du réseau Mammifères ONF, Direction Forêts et Risques Naturels laurent.tillon@onf.fr



L. Tillon examinant une cavité

Remerciements

Nous remercions l'ensemble de l'unité territoriale de Rambouillet pour sa participation active à la réalisation du présent travail, ainsi que Jocelyne Foulon pour son soutien SIG et la réalisation des cartes.

Bibliographie

Archaux F., Tillon L., Fauvel B., Martin H., 2013. Foraging habitat use by bats in a large temperate oak forest: importance of mature and regeneration stands. Le Rhinolophe n° 19, pp. 47-58

Arnett E.B., 2003. Advancing science and partnerships for the conservation of bats and their habitats. Wildlife Society Bulletin vol. 31 n°1 pp. 2-5

Arthur L., Lemaire M., 2009. Les chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Mèze: Biotope Éditions (Collection Parthénope), Publications Scientifiques du Muséum

Barataud M., 2012. Écologie acoustique des Chiroptères d'Europe, identification des espèces, étude de leurs habitats et comportements de chasse. Mèze: Biotope. Paris: Muséum national d'histoire naturelle

Kunz T. H., Fenton M.B., 2003. Bat ecology. Chicago, London: The University of Chicago Press.

Lacki M.J., Hayes J.P., Kurta A., 2007. Bats in Forests - Conservation and Management. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.

Larrieu L., Cabanettes A., Gonin P., Lachat T., Paillet Y., Winter S., Bouget C., Deconchat M.. 2014. Deadwood and tree microhabitat dynamics in unharvested temperate mountain mixed forests: a life-cycle approach to biodiversity monitoring. Forest Ecology and Management vol. 334 pp. 163-73

Mayle B.A., 1990. A biological basis for bat conservation in british woodlands - a review. Mammal Review vol. 20 n°4 pp. 159-195 Müller J., Mehr M., Bässler C., Fenton M.B., Hothorn T., Pretzsch H., Klemmt H.-J., Brandl R., 2012. Aggregative response in bats: prey abundance versus habitat. Oecologia vol. 169 pp. 673-84

Otto H.-J., 1998. Écologie forestière. Paris : Institut pour le Développement Forestier

Plank M., Fiedler K., Reiter G., 2012. Use of forest strata by bats in temperate forests. Journal of Zoology vol. 286 pp. 154-162

Regnery B., Paillet Y., Couvet D., Kerbiriou C., 2013. Which factors influence the occurrence and density of tree microhabitats in mediterranean oak forests? Forest Ecology and Management vol. 295 pp. 118-25

Tillon L., 2001. Impact de la tempête du 26 décembre 1999 sur la forêt domaniale de Rambouillet. Exemple des Chiroptères. Revue Forestière Française vol. 53 pp. 83-90

Tillon L., 2002. Étude du comportement des chauves-souris en forêt domaniale de Rambouillet dans un but de gestion conservatoire. Symbioses n° 6, pp. 23-30

Tillon L., 2004. Étude de l'impact des chablis sur la diversité biologique en forêt domaniale de Rambouillet - Impact de la tempête du 26/12/99 sur les Chiroptères, en forêt domaniale de Rambouillet (78), bilan de 3 années de suivis. Rambouillet : ONF

Tillon L., 2005. Gîtes sylvestres à Chiroptères en forêt domaniale de Rambouillet (78): caractérisation dans un objectif de gestion conservatoire. Montpellier: École Pratique des Hautes Études (Laboratoire de Biogéographie et d'Écologie des Vertébrés)

Tillon L., 2007. Statut des chauvessouris peuplant le massif forestier de Rambouillet (78), état des lieux après 8 années de suivis et d'inventaire. Symbioses n° 20 pp. 53-59

Tillon L., 2008. Inventorier, étudier ou suivre les chauves-souris en forêt, conseils de gestion forestière pour leur prise en compte. Synthèse des connaissances. Paris : ONF, FCEN

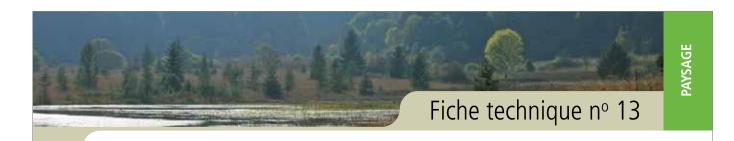
Tillon L., 2014. Bilan d'activité de la fiche action nationale sur les chauvessouris et la forêt (fiche action n° 9, plan national d'action sur les Chiroptères). Années 2009-2013. Paris : ONF, FCEN

Tillon L., 2015. Utilisation des gîtes et des terrains de chasse par les Chiroptères forestiers, propositions de gestion conservatoire. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier III, Toulouse.

Tillon L., Darnis T., Lebihan C., Giosa P., Grignon R., 2014. Stratégie d'échantillonnage des Chiroptères d'une grande forêt de production, la forêt domaniale de Tronçais (03, Auvergne, France). Symbioses n° 32 pp. 37-43



Au bonheur des Chiroptères : de vieux chênes pour des gîtes, un étang pour boire et des peuplements stratifiés pour chasser



CONSTATER, SIGNALER ET TRAITER LES DÉPÔTS SAUVAGES

CONTEXTE GÉNÉRAL

Tout objet ou substance abandonné par son détenteur devient un **déchet**, l'abandon pouvant notamment viser à se soustraire aux exigences environnementales.

Un **dépôt sauvage** est un site ponctuel résultant, le plus souvent, d'apports illégaux réalisés par des particuliers, des artisans ou des entreprises, pour se débarrasser de leurs déchets à moindre coût. Il peut s'agir de déchets dangereux, ménagers, verts ou inertes ou d'une **épave de véhicule** (véhicule hors d'usage privé de tous éléments lui permettant de circuler par ses moyens propres, irréparable et dont le propriétaire est inconnu).

Un dépôt sauvage constitue une **infraction** à la réglementation.

Il peut avoir de nombreux **impacts** dommageables : outre la dégradation des paysages, il a pour effet de polluer le sol et l'eau, d'attirer des animaux indésirables ou encore d'être à l'origine de nuisances olfactives et de dangers sanitaires.



Dépôt sauvage réalisé avec l'aide d'un véhicule en forêt domaniale de Fontainebleau

Ces dépôts sont réglementés par l'article L541-3 du code de l'environnement.

CONTEXTE POUR L'ONF

L'ONF assure la gestion durable des forêts dont il a la charge. À ce titre, il veille à l'aspect des lieux dans le souci de respecter le besoin de nature du public et de l'accueillir dans les meilleures conditions.

Dans les forêts des collectivités, l'ONF alerte le propriétaire sur la présence de dépôts, afin qu'il prenne les mesures nécessaires. Au titre de sa certification ISO 14001, l'ONF met en œuvre une politique environnementale pour maîtriser les impacts significatifs de ses activités sur l'environnement

et contrôler la conformité de ses activités à la réglementation et aux engagements pris (gestion forestière durable PEFC). Le quatrième axe de cette politique a pour thème « Préserver et valoriser les paysages », dont l'un des objectifs est de prévenir les dépôts sauvages en forêt.

La gestion des dépôts sauvages en forêt est délicate, ceux-ci étant difficilement maîtrisables.

L'ONF a réalisé une typologie de ces dépôts dans deux forêts domaniales périurbaines

(Calanques près de Marseille, Meudon près de Paris), afin de définir une stratégie et des modes opératoires adaptés.

La présente fiche technique explique les modes opératoires à suivre par les personnels de l'ONF pour constater et signaler les dépôts sauvages, puis pour intervenir afin de les traiter. Seuls sont concernés les dépôts illicites de déchets, quels que soient leur volume et leur nature.

Les termes suivis de * sont définis dans le glossaire en page 4.



CONSTATER, SIGNALER ET TRAITER LES DÉPÔTS SAUVAGES

Mode opératoire 1 : constater et signaler le dépôt

DANS TOUS LES CAS, CARACTÉRISER LE DÉPÔT

- > Procéder à son examen visuel (notamment composition, volume) et de ses environs. Estimer notamment s'il :
 - présente des risques sanitaires ou environnementaux (en cas de doute, faire appel à l'expertise d'un spécialiste (DREAL*) ;
 - a été réalisé par un professionnel (déchets non ménagers) ou non ;
 - a été réalisé avec ou sans véhicule (selon l'importance en volume ou en poids rendant impossible le transport à dos d'homme et la distance par rapport aux voies de circulation.
- > Rechercher des indices éventuels sur les auteurs.
- > Consigner toutes les informations utiles sur le registre d'ordre.
- > En forêt non domaniale, signaler le dépôt au propriétaire

■ EN CAS D'URGENCE (risques sanitaires ou environnementaux)

■ OU EN CAS DE DÉPÔT RÉALISÉ MANIFESTEMENT PAR UN PROFESSIONNEL

> Matérialiser si besoin un périmètre de sécurité clos et signalé comme zone de danger pour en interdire formellement l'accès.

VOLET PÉNAL

- > Alerter le juriste de la DT/DR et demander si besoin son appui.
- > S'il y a un risque de pollution de l'eau, solliciter l'ONEMA*.
- > Si des recherches sont nécessaires pour identifier l'auteur, solliciter l'aide de la gendarmerie ou de la police.
- > Constater l'infraction par procès-verbal (art. L541-46 4° du code de l'environnement : délit) avec le maximum d'informations (notamment plan de situation, identité de l'auteur du dépôt, composition et volumes approximatifs des déchets, description de l'environnement).

VOLET CIVIL

- > Évaluer le dommage.
- > En forêt non domaniale, conseiller au propriétaire de se constituer partie civile*.

Dans tous les cas, **I'ONF se constitue** partie civile* pour les préjudices directs ou indirects aux intérêts défendus par l'ONF ainsi que, en forêt domaniale, pour la réparation du préjudice à la propriété subi.

■ EN CAS DE DÉPÔT RÉALISÉ MANIFESTEMENT AVEC L'AIDE D'UN VÉHICULE

VOLET PÉNAL

- > Si des recherches sont nécessaires pour identifier l'auteur, solliciter l'aide de la gendarmerie ou de la police.
- Constater l'infraction par procès-verbal (art. R635-8 du code pénal : contravention de 5º classe) avec le maximum d'informations (notamment plan de situation, identité de l'auteur, composition et volumes approximatifs des déchets, description de l'environnement). Prendre si nécessaire l'appui du juriste de la DT/DR.

VOLET CIVIL

- > Évaluer le dommage.
- > En forêt non domaniale, conseiller au propriétaire de demander à la DRAAF* d'exercer l'action civile*.
- > En forêt domaniale, contacter le juriste de la DT/DR qui demandera d'exercer l'action civile*.

■ EN CAS DE DÉPÔT RÉALISÉ PAR UN PIÉTON IDENTIFIÉ

VOLET PÉNAL

- > Sensibiliser l'auteur du dépôt.
- > Dresser un timbre-amende (art. R633-6 du code pénal : contravention de 3º classe).

Le traitement doit ensuite être effectué le plus tôt possible pour éviter le risque d'un danger plus ou moins imminent lié à la sécurité ou l'environnement, l'accroissement et la prolifération d'autres dépôts, après s'être assuré que les mesures d'enquête complémentaires ont pu être réalisées.



Dépôt en FD d'Orléans

> 2 <

CONSTATER, SIGNALER ET TRAITER LES DÉPÔTS SAUVAGES

Mode opératoire 2 : traiter le dépôt

VOLET ADMINISTRATIF

L'Agence Travaux peut proposer ses services pour réaliser les travaux, si elle est habilitée.

En forêt non domaniale

> Demander au propriétaire de procéder au traitement.

Le propriétaire peut si besoin solliciter les autorités administratives compétentes (comme l'ONF pour la forêt domaniale) ou faire traiter le dépôt par les services techniques municipaux ou par des prestataires.

En forêt domaniale

> Rechercher une contribution financière annuelle des collectivités publiques voisines.

■ EN CAS D'URGENCE (risques sanitaires ou environnementaux)

> Demander au Maire (en tant qu'autorité titulaire du pouvoir de police administrative, selon l'article L2212-2 du code général des collectivités territoriales) d'arrêter les mesures nécessaires pour prévenir les dangers graves et imminents pour la santé, la sécurité publique ou

l'environnement (article L541-3 I. du code de l'environnement).

Le Maire fait traiter le dépôt par les services techniques municipaux ou par des presta-



Dépôt à risques dans une mangrove en Martinique

■ EN CAS DE DÉPÔT RÉALISÉ MANIFESTEMENT PAR UN PROFESSIONNEL OU AVEC L'AIDE D'UN VÉHICULE

- > Au cas où l'auteur du dépôt n'a pu être identifié par l'ONF dans le cadre de ses missions de police, demander au Maire (en tant qu'autorité titulaire du pouvoir de police administrative, selon l'article L2212-2 du code général des collectivités territoriales) de faire rechercher l'auteur du dépôt. Il sollicite si besoin les services de gendarmerie ou de police pour investigations complémentaires.
- Si l'auteur est connu et solvable, demander au Maire de mettre en œuvre les procédures administratives prévues (article L541-3 I. du code de l'environnement ou articles L325-1 et suivants du code de la route pour les épaves de véhicules dans un lieu où le code de la route s'applique), afin d'obliger l'auteur du dépôt à procéder à son traitement (mise en demeure, astreinte, amende administrative).

Le Maire peut décider d'exécuter le traitement d'office aux frais de l'auteur, en faisant traiter le dépôt par les services techniques municipaux ou par des prestataires. > Si l'auteur est inconnu ou insolvable et si le traitement coûte manifestement plus de 1 000 €, solliciter le Préfet (article L541-3 V. du code de l'environnement).

Le Préfet peut, avec le concours financier éventuel des collectivités territoriales, confier la remise en état du site pollué à ADEME* ou à un autre établissement public compétent. Si le Préfet refuse la prise en charge, l'ONF procède au traitement. > Si l'ONF procède au traitement, passer commande de la prestation en intégrant dans la fiche de chantier les prescriptions nécessaires. Exiger des prestataires la fourniture des documents réglementaires (autorisations préfectorales, récépissés de déclaration, bordereaux de suivi des déchets).



Dépôt réalisé par un professionnel en FD de Selomont

■ EN CAS DE DÉPÔT RÉALISÉ PAR UN PIÉTON

- > Passer commande de la prestation en intégrant dans la fiche de chantier les prescriptions nécessaires.
- > Exiger des prestataires la fourniture des documents réglementaires (autorisations
- préfectorales, récépissés de déclaration, bordereaux de suivi des déchets).

CONSTATER, SIGNALER ET TRAITER LES DÉPÔTS SAUVAGES

Pour en savoir davantage

PLUS D'INFORMATIONS

SOURCES EXTERNES

> Code de l'environnement : articles L541-1 et suivants et R541-7 et suivants

> Code forestier : articles L161-1 et L162-3 > Code pénal : articles R633-6 et R635-8 > Code de procédure pénale : article 22

SOURCES INTERNES

> NDS-12-P-114 : Dépôts sauvages et déchets diffus en forêt

> 9200-12-MOP-DEC-002 : Constater et résorber les dépôts sauvages

> 9200-10-GUI-JUR-003 : Synthèse juridique sur les déchets trouvés en forêt

> NDS-08-P-66 : Gestion des déchets et politique environnementale

> 9200-07-MOP-DEC-001 : Gestion des déchets à l'ONF

> Intraforêt

- page ebf5 : Le processus DEC

GLOSSAIRE

Action civile : L'action civile permet à la victime de l'infraction d'obtenir réparation du préjudice subi sous forme de dommages et intérêts.

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

DEC: Processus « Gérer les déchets »

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt **DREAL :** Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

DT : Direction territoriale de l'ONF

JUR: Processus « Assurer la veille et la sécurité juridiques »
ONEMA: Office national de l'Eau et des Milieux aquatiques

Partie civile : La constitution de partie civile (impossible pour les contraventions) permet à une victime de devenir partie à un procès pénal en vue d'obtenir la réparation du préjudice subi. Elle peut être réalisée à tous les stades de la procédure.

CONTACTS

AU SIÈGE

Aspects juridiques : anouk.ferte-devin@onf.fr

Aspects techniques : jean-michel.mourey@onf.fr david.peiffer@onf.fr

DANS LES TERRITOIRES

Aspects juridiques : Juristes en DT/DR

Aspects techniques : Pilotes et responsables DEC

DIRECTION DE LA PUBLICATION: ONF-DFRN/DCOM

Rédaction : Jean-Michel MOUREY, Anouk FERTE-DEVIN

Cette fiche est éditée conformément au plan d'action de la politique environnementale de l'ONF.

Direction générale 2, avenue de Saint-Mandé 75570 Paris Cedex 12

75570 Paris Cedex 12 Tél. 01 40 19 58 00 Hiver 2016

Graphisme et impression : Imprimerie ONF Fontainebleau

L'ONF est certifié ISO 9001 et ISO 14001 pour ses activités de gestion durable des forêts



EFC 10-4-4 / Promouvoir la gestion durable de la forêt / pefc-france.org





Forêt, rochers, ancienne carrière de sable : une invitation à l'évasion mais...

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)

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





ISSN: 1763-6442