

RenDez-Vous techniques

n° 18 - automne 2007

Dossier
p. 17



Gestion des futaies hétérogènes

Amendement des sols acides

p. 58



RenD ez - Vous t e c h n i q u e s

Directeur de la publication

Jacques Valeix

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Yves Birot, Jean-Marc Brézard, Léo Castex, Patrice Hirbec,
Alain Macaire, Patrice Mengin-Lecreux, Ludovic Pasquet,
Jérôme Piat, Sonia Poupeau, Thierry Sardin, Sandrine Vivier

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

page de couverture

En haut : T. Sardin, ONF

En bas : G. Del Marmol

Page d'ouverture de dossier : T. Sardin, ONF ; Y. Dumas
Cemagref ; V. Augé, ONF

Périodicité

4 numéros par an, et un hors série

Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par
abonnement auprès de la cellule de documentation tech-
nique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtech-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Prix au numéro (hors frais de port) :

n° ordinaire : 10 euros ; hors série : 20 euros

Abonnement : 35 euros : 1 an = 4 numéros ordinaires
(prix du hors série pour les abonnés = 15 euros)

Dépôt légal : décembre 2007

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un Comité de lecture.

sommaire

N°18 automne 2007

- 3 **E**n bref
- 4 **P**ratiques
Après la tempête de 1999, Prunus serotina envahit le sud du massif de Haguenau
par Pierre Geldreich et Richard Boeuf
- 9 **M**éthodes
La surface terrière, méthodes de mesure et intérêts
par Thomas Cordonnier, Mien Tran-Ha, Jérôme Piat et Didier François
- 17** **dossier pratiques**
Gestion des futaies hétérogènes
- 58 **C**onnaissances
Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés
Impact des amendements basiques sur les sols et leur environnement
par Alain Brêthes
- 65 **P**ratiques
Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés
Où, pourquoi et comment amender ?
par Alain Brêthes
- 73 **M**éthodes
Conserver les ressources génétiques de l'épicéa commun en France : pourquoi, comment ?
par Françoise Plancheron, Alain Valadon et Bruno Fady

éditorial

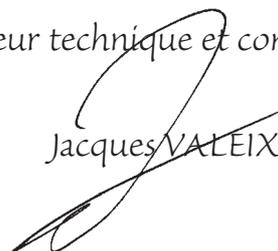
A lors que s'annonce début 2008 un atelier gestionnaires – chercheurs destiné à tirer les enseignements des dispositifs d'étude sur la « reconstitution après tempête », Pierre Geldreich alerte les forestiers sur le développement rapide du cerisier tardif (*Prunus serotina*), compromettant la reconstitution sur un millier d'hectares en forêt de Haguenau. Le phénomène est d'autant plus inquiétant qu'il n'est pas isolé et nous aurons l'occasion d'y revenir dans une prochaine édition ; mais, d'ores et déjà, l'article donne de premières recommandations pratiques pour identifier l'espèce, comprendre sa dynamique et prendre les dispositions préventives qui s'imposent.

Le dossier du présent numéro est consacré à la gestion des futaies hétérogènes. En effet, après une première évocation, à caractère théorique, réalisée dans cette même revue à l'automne 2005, nous avons souhaité y revenir en privilégiant cette fois un regard plus pratique, et montrer notamment comment, à travers les dispositions de nouveaux guides de sylviculture et le témoignage de gestionnaires impliqués dans ce type de gestion, les principes de base de la futaie irrégulière se déclinent selon des situations sylvicoles très contrastées.

Enfin, dans un registre bien différent, nous abordons la question de la restauration de la fertilité et de l'activité biologique des sols forestiers dégradés. Les gestionnaires forestiers ont généralement conscience de la pauvreté des sols acides, de leur sensibilité aux dépôts atmosphériques, ainsi que des dégradations que peut leur occasionner toute surexploitation comme en témoignent les dommages persistants hérités du passé. Mais, curieusement, les perspectives de restauration par amendement calcique restent largement méconnues, malgré des résultats expérimentaux solidement documentés. Aussi, nous publions ici deux articles pour faire le point dans ce domaine : l'un montre comment et dans quelles limites l'amendement peut améliorer le fonctionnement biologique d'un sol, l'autre propose une démarche de diagnostic et aborde les questions de mise en œuvre pratique.

Le Directeur technique et commercial bois

Jacques VALEIX



Erratum pour le hors-série n° 2 de nos Rendez-vous techniques

Nous relayons la réaction de Jean-Daniel Bontemps, le 6 novembre dernier, après la diffusion du hors-série n° 2 sur la gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises.

« Une petite remarque concernant l'introduction de l'article [Croissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France, p. 39] : elle mentionne les travaux de chercheurs de l'Inra, alors que cette étude est 100 % Engref et ONF, de par les personnels qui ont travaillé dessus, et le financement des travaux (données et conception ONF pour les analyses initiales, thèse Engref + personnels Engref pour la suite). L'Inra n'a donc pas dépensé un seul euro pour cette étude, et c'est finalement un peu dommage que l'Engref ne soit pas mentionnée à sa juste participation. »

Nous avons en effet écrit, dans le chapeau de présentation : « Les forestiers ne disposaient pas de courbes de croissance en hauteur dominante pour le hêtre en France. C'est aujourd'hui chose faite grâce à l'exploitation, par des chercheurs de l'INRA, d'analyses de tiges menées par l'ONF... ».

Nous présentons donc nos excuses à l'ENGREF, injustement négligée, et aux auteurs de l'article que nous avons mis dans l'embarras : Jean-Daniel Bontemps qui nous a signalé l'erreur, mais aussi Pierre Duplat, Jean-Christophe Hervé et Jean-François Dhôte.

Le CTBA et l'AFOCEL sont devenus FCBA



Après deux ans de partenariat, la fusion est effective depuis le 1^{er} juin dernier entre le

CTBA (centre technique du bois et de l'ameublement) et l'AFOCEL (association forêt cellulose), dont les recherches portent en particulier sur les approvisionnements de l'industrie et de la filière forêt-bois-papier. La nouvelle entité, baptisée Institut technologique FCBA (forêt, cellulose, bois, ameublement) a pour mission de favoriser une meilleure exploitation de la ressource forestière française, et d'aider le bois à faire face à une concurrence internationale accrue mais aussi à la concurrence des autres matériaux. Le FCBA se veut un outil unique, plus innovant et plus performant, à la disposition de l'ensemble de la filière.

À lire

■ Le numéro spécial 3-2007 de la *Revue forestière française* rend compte de l'Ecoforum, organisé en décembre 2006 par le GIP ECOFOR sur le thème : **face aux changements environnementaux, sociétaux, économiques, quelle gestion, quelle recherche pour la forêt de demain ?**

« *Changements globaux, crise énergétique, montée des attentes sociales, progrès scientifique et technique, mouvement démographique, élévation du niveau de vie, risques grandissants : le contexte environnemental, sociétal et économique avec lequel les gestionnaires forestiers doivent composer évolue profondément, rapidement et d'une manière laissant subsister de nombreuses incertitudes pour le futur.*

Caractérisé par une grande inertie, le secteur forestier a développé depuis longtemps une culture du long terme. Le changement, l'incertitude et le risque n'y ont cependant guère été intégrés. Maintenant que se révèle leur importance, les prendre en considération devient un défi forestier majeur. Il conduit à développer connaissances et innovations. Il engage aussi les forestiers prati-

ciens, chercheurs, experts, à élaborer des stratégies collectives et partagées pour agir efficacement et faire entendre leur voix. Cette logique amène à se ménager des espaces de débat, à l'instar d'Ecoforum 2006. »

Revue forestière française, numéro 3-2007 (144 pages)

Prix de vente à l'unité :

15 euros TTC franco de port

Commandes à :

Revue forestière française, AgroParisTech ENGREF ; 14 rue Girardet ; CS 14216 ; 54042 NANCY CEDEX.

Tél. : 03.83.38.68.23

fax : 03.83.39.68.25

courriel : genevois@engref.fr

■ Le n°177 de *Forêt-entreprise* propose un dossier de 45 pages sur **le robinier faux acacia** aujourd'hui : biologie, sylviculture et marché, en régions et dans le monde. C'est la première revue forestière à consacrer un dossier sur le robinier ; cette essence, au statut parfois controversé, ne manque cependant ni d'atouts ni de perspectives.

« *Le robinier faux acacia produit rapidement un bois d'œuvre de qualité (en 35 à 40 ans). C'est la seule espèce des forêts européennes à être admise en classe 4 (comme le teck). Très plastique, le robinier est présent sur des sols et sous des climats variés. Il présente une très forte croissance juvénile et une grande efficacité photosynthétique (taux élevé d'assimilation nette du carbone), ce qui en fait un bon candidat pour les cultures de biomasse. »*

Forêt-entreprise n°177 (68 pages)

Prix de vente à l'unité :

9 €50 (+3 € frais d'envoi)

Commandes à :

IDF-Diffusion

23, avenue Bosquet, 75007 PARIS

Tél. : 01 40 62 22 81

fax : 01 40 62 22 87

courriel : idf-librairie@cnpff.fr

Après la tempête de 1999, *Prunus serotina* envahit le sud du massif de Haguenau

Le 26 décembre 1999 est une date mémorable pour le massif de Haguenau. En l'espace de 3 heures, avec le passage de la tempête Lothar, l'essentiel des pineraies, depuis les perchis aux futaies adultes, a été décimé ; selon la classe d'âge et la nature du sol, les arbres ont été cassés ou renversés sur des surfaces importantes allant parfois jusqu'à la centaine d'hectares d'un seul tenant. Les dégâts constatés dans le massif de Haguenau représentaient 43 % de ceux observés dans la région Alsace ; leur ampleur a été évaluée à 1,6 million de m³ de bois chablis à récolter, 8 400 ha affectés significativement et 5 300 ha totalement détruits et à reconstituer. Le massif a ainsi été touché sur 40 % de sa surface, certaines forêts communales exclusivement résineuses de la frange sud ayant été détruites dans leur quasi-totalité, à l'exception des très jeunes peuplements (taux de dégâts avoisinant 70 %).

Stratégie générale de reconstitution après tempête

Devant l'ampleur de la tâche, une stratégie de reconstitution a été élaborée. Elle a d'abord consisté en un réaménagement complet et groupé du massif. Les mots d'ordre principaux ont été exploitation respectueuse des sols, conservation des semenciers potentiels, **priorité à la régénération naturelle, y compris dans la succession végétale incluant les essences pionnières**. Ne devaient être plantées que les stations neutrophiles et acidiphiles occupées de pineraies d'origine anthropique, soit une surface de 850 ha environ, dont 600 ha à valoriser par le chêne sessile. Grâce à la mécanisation et à la régie, l'exploitation des chablis a été menée rapidement. Fin 2001, moins de deux

Le massif de Haguenau

C'est une entité forestière compacte et homogène de 22 000 ha qui barre la plaine d'Alsace d'ouest en est depuis les Vosges du nord au Rhin. Il est constitué de 23 forêts dont la forêt indivise de Haguenau, centrale avec ses 13 500 ha (64 %), 4 forêts domaniales (1 500 ha), et 17 forêts communales (7 000 ha). Les sols sont issus d'alluvions vosgiennes déposées dans les cônes de déjection de plusieurs rivières alimentant le Rhin. Ils sont très majoritairement acides et hydromorphes et occupés selon leur fertilité par la pineraie ou la chênaie-hêtraie

années après l'événement, 85 % des bois détruits étaient récoltés et commercialisés et les parcelles concernées nettoyées, prêtes à la reconstitution.

Dans les obstacles à la régénération naturelle, l'aménagement de 2001 cite au titre des phénomènes de blocage, les tapis herbacés de fougère aigle (1 100 ha) et de molinie bleue (1 000 ha). Le cerisier tardif (*Prunus serotina*) est évoqué par sa présence sur une trentaine d'hectares, sa faculté éventuelle à éduquer des semis naturels d'essences précieuses mélangées, et la possibilité de le valoriser en bois de fruitier à terme. Son caractère invasif, bien qu'évoqué par des forestiers locaux et par un expert allemand consulté oralement sur le sujet, était signalé mais a certainement été alors sous estimé.

Bilan des régénérations après 7 années : un sérieux problème

En 2006, conformément aux prescriptions de l'aménagement et à la stratégie de reconstitution, un

bilan a été réalisé sur les résultats obtenus en matière de régénération après la tempête.

Vides et régénération

Globalement, en dépit des difficultés stationnelles, seules 18 % des surfaces restent vides de ligneux ; elles correspondent majoritairement aux parcelles à régénération bloquée par la fougère aigle. Cette espèce n'a toutefois pas élargi son domaine de présence de 2001. Sur 20 % de surface complémentaire, les ligneux restent clairs (densité de 500 à 1 500 par ha), et sur 62 %, ils apparaissent denses (dépassant 2 000 par ha). Bouleau verruqueux (31 %), pin sylvestre (24 %), hêtre (11 %), chênes (7 %) et charme (5 %) sont les essences les plus présentes ; certains semis atteignent d'ores et déjà 3 mètres de hauteur. Ainsi, si l'on intègre le bouleau dans les essences de production et les cycles sylvicoles, le processus de régénération s'est révélé relativement satisfaisant et conforme aux prévisions et préconisations de 2001.

Le problème spécifique « *Prunus serotina* » :

Un autre ligneux, toutefois non comptabilisé en semis dans l'étude précédente car noté en végétation concurrente, a prospéré et gagné du terrain. Il s'agit du cerisier tardif, cet arbre exotique américain, auparavant signalé seulement de manière anecdotique sur les forêts communales d'Oberhoffen et de Brumath (30 à 50 ha). En 2006, l'espèce est **présente sur 3 000 ha** de surface tempêtée, très disséminée sur 2 000 ha, mais aussi **envahissante sur 1 000 ha** où elle entrave la régénération d'autres essences (figure 1).

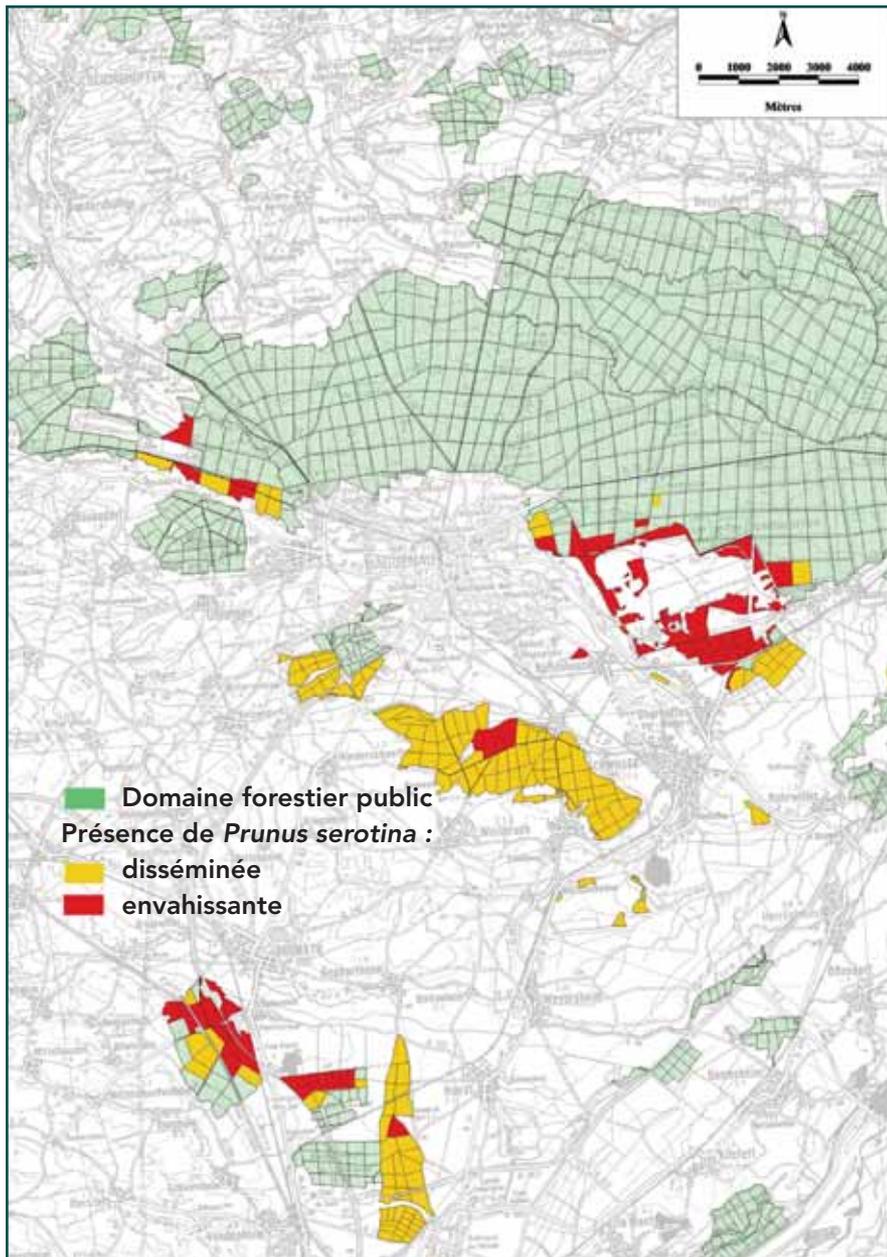


Fig. 1 : Localisation des parcelles concernées par *Prunus serotina* en 2005

Sa progression est considérable, comparable à celle du bouleau, lui aussi présent sur environ 3 000 ha. Mais, outre son caractère exotique, *Prunus serotina* se différencie nettement du bouleau sur plusieurs points :

- le développement autour des zones de présence isolées et connues avant 1999, c'est-à-dire la frange sud du couloir de dégâts provoqué par la tempête ;
- la présence **exclusive** sur les 1 000 ha envahis, c'est-à-dire l'absence quasi totale de

mélange avec des semis d'autres espèces ;

- le cantonnement aux stations acides non hydromorphes (sols podzoliques drainés) ;

- **la très mauvaise qualité des sujets**, qui présentent très jeunes et d'une manière générale, de franc pied ou en rejet, un port buissonnant avec de nombreuses fourches les rendant *a priori* inaptes à la production de grumes ;

- le nombre significatif des semis qui se révèlent fructifères, dès leur 6^e année.

Enfin, à signaler aussi parmi les secteurs envahis, une série d'intérêt écologique et paysager et une partie de zone Natura 2000 proche, **la pineraie sur dunes continentales**. Cette station particulière et rare du massif de Haguenau, liée à des sols sableux encore jeunes, présentait des pelouses ainsi que des faciès de peuplement originaux, aujourd'hui dénaturés et en cours de fermeture par *Prunus serotina*.

Se documenter pour mieux réagir

Compte tenu du **caractère particulier de l'invasion** — exclusion d'autres essences (blocage), fructification précoce, mauvaises formes avec faibles perspectives de valorisation — des recherches plus poussées ont été entreprises sur le sujet.

Historique de l'espèce sur le massif de Haguenau

Au niveau du massif d'abord, la consultation des documents d'aménagement échus et l'enquête auprès de forestiers en place depuis longtemps, a permis de documenter la présence ancienne issue :

- de plantations en bandes pare-feu le long de routes publiques sur des stations particulièrement pauvres en forêt communale d'Oberhoffen, dans les années 1950 à 1960, en lieu et place du chêne rouge d'Amérique habituellement utilisé dans cet objectif, mais dont l'implantation avait échoué ;
- d'arbres isolés de parcs (Stephansfeld) à proximité de la forêt de Brumath ;
- d'arbres isolés de lisière en forêt communale de Weitbruch.

Sur une cinquantaine d'hectares, le caractère envahissant existait avant même la tempête de 1999, mais sous la forme exclusive de sous étages arbustifs dans de jeunes futaies de pin. Comme les pineraies concernées étaient



Mauvaise forme des fourrés

C. Portejoie, ONF



Envahissement d'une pineraie éclaircie par la tempête

C. Portejoie, ONF

encore éloignées de l'objectif de rajeunissement, le phénomène était ignoré, voire considéré positivement du point de vue de la couverture du sol et de la production d'un humus favorable sur des stations acides.

Les études faites ailleurs

Les études bibliographiques effectuées ont rapidement mené à des contacts avec les gestionnaires du massif de Compiègne. *Prunus serotina* y est aujourd'hui présent sur 80 % de la surface, et a fait l'objet d'un programme de recherches dédié, coordonné par le professeur Guillaume Decocq de l'université de Picardie Jules Verne. L'objectif du projet est de définir les modalités de l'invasion, ainsi que d'en évaluer les conséquences écologiques, économiques et sociologiques.

Dans d'autres pays de l'Europe du nord, des études sont également en cours, notamment en Belgique. Dans ce pays, la communauté forestière vient d'éditer une fiche technique spécifique à l'intention de tous les gestionnaires. En Allemagne, les phytosociologues décrivent d'ores et déjà un groupement à *Prunus serotina* (POTT 1995).

Synthèse : une espèce indiscutablement envahissante

Ces recherches ont permis d'en savoir davantage sur *Prunus serotina* et de confirmer les observations initiales.

L'espèce présente **des caractéristiques particulières** qui expliquent amplement le phénomène constaté sur Haguenau après Lothar :

- grande tolérance vis-à-vis de l'ombrage : possibilité d'entrer en quiescence (stade semis pendant plusieurs décennies) voire de revenir d'un stade arbustif à un état buissonnant en l'absence de lumière (par drageonnement) ;
- caractère pionnier et faculté d'explosion à la faveur des perturbations de couvert avec dans ce cas une croissance très vigoureuse ;
- grande plasticité par rapport aux sols, mais préférence pour les terrains acides et limitation seulement par l'hydromorphie significative (espèce mésophile, acidiphile au caractère psammophile) ;
- fructification précoce et abondante (espèce néoténique), fruits ingérés par les oiseaux et les mammifères qui les transportent (zoochorie) ;
- enracinement dense et abondant ;

■ reproduction végétative très compétitive, par rejet de souche, marcotte et drageon ;

■ absence de parasites létaux ;

■ faible pression des ongulés grâce à un feuillage contenant des composés cyanhydriques toxiques.

Prunus serotina est présent dans toute l'Europe jusque sur les dunes de la Baltique et y est aujourd'hui considéré comme envahissant, car il étouffe la végétation au sol et empêche la régénération naturelle des essences autochtones. Les qualités technologiques générales apparaissent médiocres partout, probablement pour des raisons génétiques. Tous les essais de valorisation sylvicole ont conduit à l'échec. La lutte est difficile, nécessairement intensive et répétitive, et aussi fort coûteuse. L'éradication a été tentée, mais a échoué dès que l'envahissement était significatif.

En dépit de ces problèmes, la médiatisation du phénomène reste faible. L'espèce était encore utilisée il y a peu d'années en reboisement de sols pauvres. Elle est toujours commercialisée par les pépiniéristes comme plante ornementale... De nombreux

Le cerisier tardif, *Prunus serotina* Ehrh.

Le cerisier tardif est originaire d'Amérique du nord et appartient à la famille des Rosacées ; il présente des feuilles simples, coriaces, luisantes en face supérieure, mates en face inférieure, simplement dentées, de 6 à 12 cm de longueur et 2,5 à 5 cm de largeur. **Un facteur essentiel et distinctif de reconnaissance : les poils situés de part et d'autre de la nervure centrale de la face inférieure de la feuille.** L'écorce de l'arbre est brun rougeâtre, mais devient noire avec le vieillissement. Les fleurs sont blanches et en grappe ; les fruits noirs de 4 à 8 mm de diamètre sont comestibles, mais amers.

Prunus serotina (cerisier tardif) peut être confondu avec *P. virginiana* (cerisier de Virginie) ou *P. padus* (cerisier à grappes) : voici une clé partielle pour les distinguer.

■ Feuilles lustrées, luisantes à la face supérieure, absence de glandes nectarifères au contact limbe/pétiole ; inflorescence dressée ; fruits pourpres à noirâtres ; endocarpe (noyau) lisse ; rameaux et réceptacles glabres

- Face inférieure des feuilles à nervures foliaires (au moins 15 paires) peu prononcées et pubescentes, lenticelles claires nombreuses et bien visibles (arbre > 7 m)
***P. serotina* Ehrh.**

- Face inférieure des feuilles à nervures foliaires (moins de 15 paires) saillantes et glabres (quelques touffes axillaires), rameaux à lenticelles éparses (arbuste ≤ 7 m)
***P. virginiana* L.**

■ Feuilles mates à la face supérieure, présence de glandes nectarifères au contact limbe/pétiole ; inflorescence pendante à étalée ; fruits noirs à endocarpe sillonné ; rameaux et intérieurs du réceptacle poilus

- Grappe pendante, face inférieure des feuilles glabre [port arborescent ; plaine ; forêt alluviales]
***P. padus* subsp. *padus* L.**

- Grappe dressée ou étalée, face inférieure des feuilles pubescente [port arbustif ≤ 3 m ; Hautes Vosges, Alpes couloirs d'avalanche]
***P. padus* subsp. *borealis* Nyman**

développement du peuplement sera suffisant (20 ans ?). Un éventuel retour à la régénération de pin sylvestre est envisageable par plantation dense immédiatement après récolte totale. Pour les quelques parcelles envahies sur bonne station, une production d'accompagnement pourrait être envisagée avec des essences résineuses à croissance initiale rapide, comme le douglas vert ou le pin sylvestre, à introduire en groupes pour limiter les coûts de dégagement initiaux.

Sur les 2 000 ha complémentaires sur lesquels le cerisier tardif n'est que disséminé, bouleaux et pins sylvestres dominent la régénération. Les stations présentent très majoritairement un caractère hydromorphe marqué, ne laissant craindre aucune extension du phénomène d'invasion. Il faudra prévoir **l'extraction des sujets de *Prunus serotina* à l'occasion de la première éclaircie** (20 ans ?) pour chercher à réduire le potentiel de dissémination de l'espèce. À noter que les expériences d'annélation ne donnent pas de résultats satisfaisants, l'espèce rejetant immédiatement sous l'anneau privé d'écorce.

Sur les stations acides sèches du nord du massif non encore affectées, il est conseillé de procéder à **l'éradication des petits semis de *Prunus serotina* au fur et à mesure** de leur apparition. D'une manière générale, sur les terrains sableux hors des zones chablis de 1999, il est nécessaire aussi de procéder à une gestion appropriée de la lumière dans les peuplements en respectant les sous étages actuels qui maintiennent l'ombrage du sol.

Ailleurs, prévenir le risque

L'expérience d'Hagenau mérite d'être documentée et connue au-delà de l'Alsace ; elle correspond à une **invasion** doublée d'un véritable **blocage ligneux**. Elle doit

forestiers ignorent, ou reportent le problème, à l'instar de ce qui s'est produit sur Hagenau au motif que la situation n'est pas encore catastrophique et qu'il n'y a pas de régénération urgente dans les zones de présence.

Les suites possibles

Des « solutions » réalistes pour Hagenau

Sur les 1 000 ha envahis du massif de Hagenau la lutte paraît impos-

sible ; la densité des semis de *Prunus serotina* y est telle que l'opération, à la lumière des expériences menées ailleurs, serait perdue d'avance et non réalisable sur le plan économique. Par ailleurs, les stations concernées, sauf exception (certaines parcelles de la forêt de Brumath sur sols bruns acides) sont pauvres et ne méritent pas de fort investissement. Une alternative plausible sera la **valorisation en bois énergie**, sous la forme de plaquettes, dès que le



Prunus serotina : feuilles et fleurs



Pubescence sous la feuille de *Prunus serotina*

R. Boeuf, ONF

enrichir le guide « reconstitution » rédigé après la tempête de 1999, qui constitue un ouvrage de référence au sein et hors de l'Office national des forêts, et ne décrit que des phases de blocages herbacés ou semi-ligneux. Plusieurs grands massifs forestiers de l'hexagone sont *a priori* sensibles (présence de peuplements résineux fragiles sur sols acides) et pour-



R. Boeuf, ONF

Tapis de semis de *Prunus serotina* formant blocage ligneux

raient potentiellement connaître des phénomènes comparables à celui décrit précédemment.

Tous les forestiers devraient avoir aussi une bonne connaissance de l'espèce *Prunus serotina* et de ses facultés originales de multiplication. Sa présence ou son arrivée pourraient ainsi être cartographiées et reportées dans un sys-

tème d'information géographique, car les simples signalements réalisés par les naturalistes ne sont que rarement extrapolables en surface. La vision globale ainsi obtenue et les croisements avec des cartes de stations et de peuplement qu'autorise le SIG permettront de réfléchir à une stratégie générale et de décider en connaissance de cause.

L'arrivée des espèces ligneuses invasives en forêt n'est qu'un phénomène isolé parmi les nombreux autres annoncés et attendus avec les changements climatiques et globaux. Pour autant, les forestiers doivent en avoir conscience et ne pas baisser les bras.

Pierre GELDREICH
Richard BOEUF
ONF, DT Alsace

Remerciements

Nous remercions Florian Baland et Claire Portejoie de l'ONF Alsace, Jérôme Jaminon de l'ONF Compiègne et Olivier Chabrier de l'université de Picardie Jules Verne.

Bibliographie

DECOCQ G., [2006]. Dynamique invasive du cerisier tardif, *Prunus serotina* Ehrh., en système forestier tempéré : déterminants, mécanismes, impacts écologiques, économiques et socioanthropologiques. In Rapport du programme INVABIO II - *Prunus serotina* (Decocq G., dir.). Paris : Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Université de Picardie Jules Verne, 38 p.

PAIRON M., VERVOORT A., JACQUEMART A.L., 2006. Les espèces envahissantes : le cas du cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh). *Silva Belgica*, vol. 113, n° 4, pp. 50-53

MORTIER F., 2001. Reconstitution des forêts après tempêtes : guide. Paris : ONF Direction technique. 148 p.

POTT, R., 1995 Die Pflanzengesellschaften Deutschlands. 2. Auflage. Stuttgart : Ulmer. 622 p.

La surface terrière : méthodes de mesure et intérêts

Contexte et objectif

La surface terrière occupe aujourd'hui une place de plus en plus importante dans la gestion forestière. Rapide à mesurer à l'aide de méthodes optiques éprouvées ou par des mesures simples de circonférences ou de diamètres, elle permet d'avoir une idée, à faible coût, du capital sur pied des peuplements. Elle trouve sa place aujourd'hui dans les actions de diagnostic des peuplements, de suivi des itinéraires sylvicoles, d'élaboration et de suivi des aménagements. Elle est également assimilée à une mesure d'intensité de compétition entre les arbres d'un peuplement et considérée comme un indicateur pertinent du renouvellement des futaies irrégulières. Surtout, la surface terrière constitue, seule ou en association avec d'autres éléments, un indicateur performant pour l'estimation de variables plus complexes et difficiles à obtenir par des mesures simples sur le terrain, tel le volume. Dans cet article, nous présentons brièvement ce que représente la surface terrière, comment la mesurer et comment elle est utilisée aujourd'hui dans le cadre de la sylviculture et de l'aménagement.

Qu'est ce que la surface terrière ?

D'un point de vue théorique, la surface terrière g d'un arbre est la surface de sa section transversale à 1,30 m (figure 1). La surface terrière G d'un peuplement (ou d'un ensemble quelconque d'arbres) est alors la somme des surfaces terrières de tous les arbres constituant ce peuplement (ou cet ensemble). On se restreint le plus souvent aux arbres précomptables

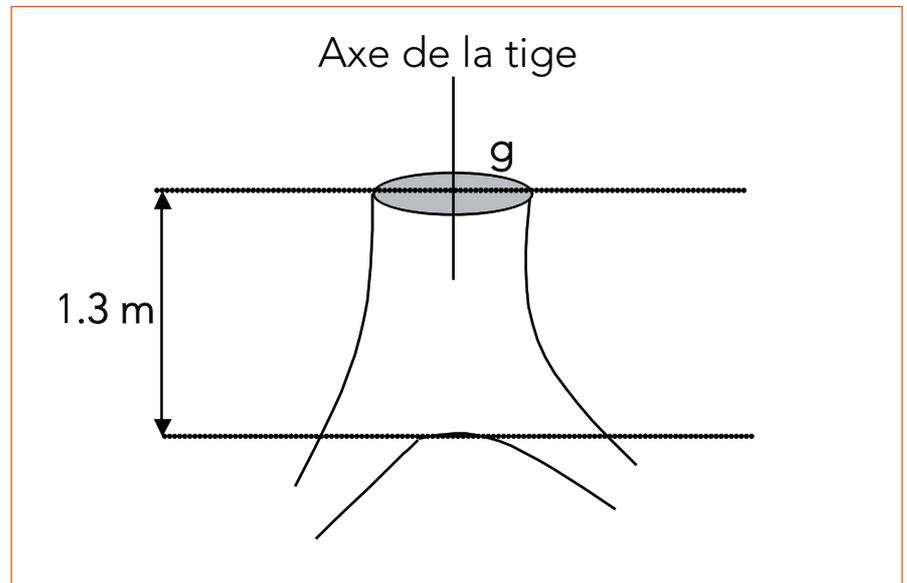


Fig. 1 : définition de la surface terrière g d'un arbre

(exemple : arbres de plus de 17,5 cm de diamètre). En cohérence avec les normes internationales, la surface terrière est habituellement donnée en mètres carrés¹.

D'un point de vue plus pratique, on ne peut raisonnablement accéder à la surface exacte de la section d'un arbre à 1,30 m. Une estimation g_e de la surface terrière g d'un arbre peut-être obtenue à partir d'une simple mesure de circonférence c à 1,30 m en utilisant la formule suivante :

$$g_e = c^2 / 4\pi$$

estimation qui se révèle toujours légèrement supérieure à la surface terrière vraie de l'arbre (<5% en général, manuel Inventaire de l'ONF, Duplat et Perrotte 1981, pp. 22-23). En raison de la simplicité de la mesure de circonférence, les forestiers ont donc préféré adopter une définition plus pragmatique de la surface terrière : **la surface terrière d'un arbre est la surface du cercle ayant pour circonférence la circonférence de**

l'arbre à 1,30 m. La mesure de circonférence permet ainsi, en théorie, d'obtenir une estimation exacte de la surface terrière.

Une définition qui privilégie la mesure de circonférence

Il est important ici de noter que la mesure du diamètre d au compas forestier (direction de mesure prise au hasard) pour l'estimation de la surface terrière ($g_e = \pi d^2 / 4$) ne satisfait pas notre définition. La mesure d'un seul diamètre ne permet d'obtenir qu'une estimation aléatoire de la surface terrière. On démontre en outre qu'elle conduit en moyenne à une surestimation, de peu il est vrai (Duplat et Perrotte 1981, p. 24). Le calcul de la moyenne de deux diamètres mesurés perpendiculairement, s'il améliore l'estimation, n'est pas une solution optimale compte tenu des risques d'erreurs liées à l'utilisation des compas. On préférera donc, autant que faire se peut, et à condition de la réaliser de manière rigoureuse, la mesure de la circonférence à celle du dia-

¹ mais on trouve encore outre-atlantique des inchs carrés !

mètre. Toutefois, quand l'objectif poursuivi n'exige pas une précision importante, la mesure d'un diamètre reste satisfaisante. À noter que l'utilisation de classes de diamètre de 5 cm implique certes un biais dans l'estimation de la surface terrière d'un peuplement, mais ce biais reste acceptable dans le cadre de la gestion courante (Duplat et Perrotte 1981, p. 26).

Surface terrière : quelle signification ?

La surface terrière g ou G étant ainsi définie, la première question qui vient à l'esprit est : que signifie-t-elle ? Prise telle quelle, la surface terrière ne peut être directement associée à une notion d'occupation de l'espace par les arbres (Zeide 2005). Une illustration simple consiste à imaginer deux peuplements de même surface terrière mais de structures diamétriques très différentes, par exemple un jeune perchis et une vieille futaie : si les surfaces sont équivalentes, il paraît bien hasardeux de les situer sur le même plan d'un point de vue sylvicole.

La surface terrière permet en réalité d'accéder à d'autres grandeurs importantes, difficiles à appréhender par une mesure simple sur le terrain. Combinée à une hauteur totale d'un arbre (ou hauteur totale moyenne d'un peuplement), la surface terrière g (ou G) permet d'estimer, avec une précision acceptable, le volume tige principale de l'arbre (respectivement du peuplement) (Tran-Ha et al., sous presse). Il est également possible d'estimer le volume bois aérien (tige + branches) à partir de la surface terrière et de la hauteur totale (Vallet et al. 2006). Associée à la date de la dernière coupe et à l'âge du peuplement, la surface terrière peut également fournir une bonne estimation de la quantité (moyenne et écart-type) de lumière arrivant au sol en futaie régulière monospécifique (Sonohat et al. 2004). Enfin, associée au nombre

de tiges, elle peut également permettre le calcul d'indices de densité plus pertinents comme l'indice de densité de Reineke (Zeide 2005 ; voir encadré 1).

Dans certains cas, la surface terrière suffit à elle seule à définir l'intensité de compétition subie par les tiges. Schütz (1997) a par exemple montré, dans le cadre très particulier des futaies résineuses jardinées, que la croissance en diamètre des arbres d'une catégorie de diamètre donnée dépendait étroitement de la surface terrière cumulée des tiges de plus gros diamètre.

La surface terrière semble également bien corrélée à la surface du

houppier en futaie irrégulière (Bruciamacchie et Turckheim 2005), en tout cas pour les arbres ayant subi une compétition modérée au cours de leur développement. Malgré cela, les liens entre surface terrière et lumière dans ces peuplements complexes restent ténus (Piboule 2005), nécessitant de plus amples investigations pour déterminer les variables de structure pertinentes.

Comment mesurer la surface terrière ?

Au niveau arbre, la mesure de la circonférence au ruban constitue, en première analyse, l'approche la plus satisfaisante. Elle n'est cependant pas exempte de contraintes et

1 - L'indice de densité de Reineke (1933)

La surface terrière ou le nombre de tiges ne peuvent conduire isolément à une approche dendrométrique pertinente du peuplement. En revanche l'association des deux se révèle particulièrement intéressante pour comparer des peuplements entre eux. En 1933, Reineke a mis en évidence la relation suivante entre le nombre d'arbres N et le diamètre moyen de ces arbres (certains utilisent le diamètre quadratique moyen d_g) dans des peuplements dits complets (sans interventions) :

$$N = k\bar{d}^{-1,605}$$

Reineke proposa ainsi l'indice de densité *SDI* (Stand Density Index) :

$$SDI = N \left(\frac{\bar{d}}{25,4} \right)^{1,61}$$

qui correspond au nombre d'arbres de diamètre 25,4 cm (10 inches) nécessaires pour obtenir la même densité que celle du peuplement de diamètre moyen et de nombre d'arbres N auquel on s'intéresse. Reineke argua que cette relation fonctionnait quelle que soit l'espèce ou la fertilité. En réalité l'exposant, dans la relation, dépend de l'espèce considérée. En divisant la valeur de *SDI* par sa valeur maximale et en remplaçant le diamètre moyen par le diamètre quadratique moyen on obtient un indice de densité de Reineke modifié *RDI* qui peut être mis sous la forme générale suivante :

$$RDI = \frac{N^\alpha G^\beta}{\gamma}$$

où G représente la surface terrière et α , β , γ des paramètres à estimer. Par exemple, dans le cas du hêtre, $\alpha = 0,1665$, $\beta = 0,8335$ et $\gamma = 70,1245$ (Simon et al. 2007).

Cet indice, qui varie entre 0 (pas d'arbres) et 1 (le peuplement présente une densité maximale et la mortalité par compétition est maximale), est, pour une essence donnée, indépendant de la station (donc de la hauteur dominante et de la fertilité) et peut donc être utilisé pour comparer différents peuplements réguliers.

défauts. Lorsque les arbres présentent des diamètres élevés ou sont branchus, la mesure de la circonférence devient rapidement fastidieuse et peut même entraîner des mesures erronées (ruban non disposé perpendiculairement à l'axe de la tige). La mesure de la circonférence sera donc abandonnée au profit de mesures de diamètres, plus rapides, dans les peuplements dominés par des arbres branchus et des arbres de gros diamètres. On rappelle ici qu'une mesure correcte du diamètre au compas implique que le compas n'ait pas de jeu au niveau du bras mobile. Le choix d'une ou plusieurs mesure(s) de diamètre(s) ou d'une mesure de circonférence doit être déterminé avant toute campagne de mesures.

Mesurer la surface terrière d'un peuplement

Il existe différentes méthodes permettant d'appréhender la surface terrière dans un peuplement de surface connue (figure 2).

La méthode la plus directe est la réalisation d'un **inventaire en plein** avec mesure des circonférences (ou diamètres). Ce type d'inventaire permet théoriquement d'obtenir une mesure exacte de la surface terrière du peuplement. L'expérience montre cependant qu'il doit être plutôt réservé à des peuplements présentant une faible densité. L'inventaire en plein conduit en effet souvent à une sous-estimation de la surface terrière car certaines tiges sont oubliées. En outre, l'intérêt de ce type d'inventaire se limite à de petites surfaces (<50 ha soit quelques parcelles). Au delà, l'inventaire en plein devient trop coûteux.

Les méthodes actuellement les plus usitées sont celles basées sur un **échantillonnage statistique** avec placettes à surface fixe ou placettes à angle fixe appelées également placettes Bitterlich. Les placettes à surface fixe, le plus souvent circulaires et de rayon supérieur à 20 m dans le cas des peuplements

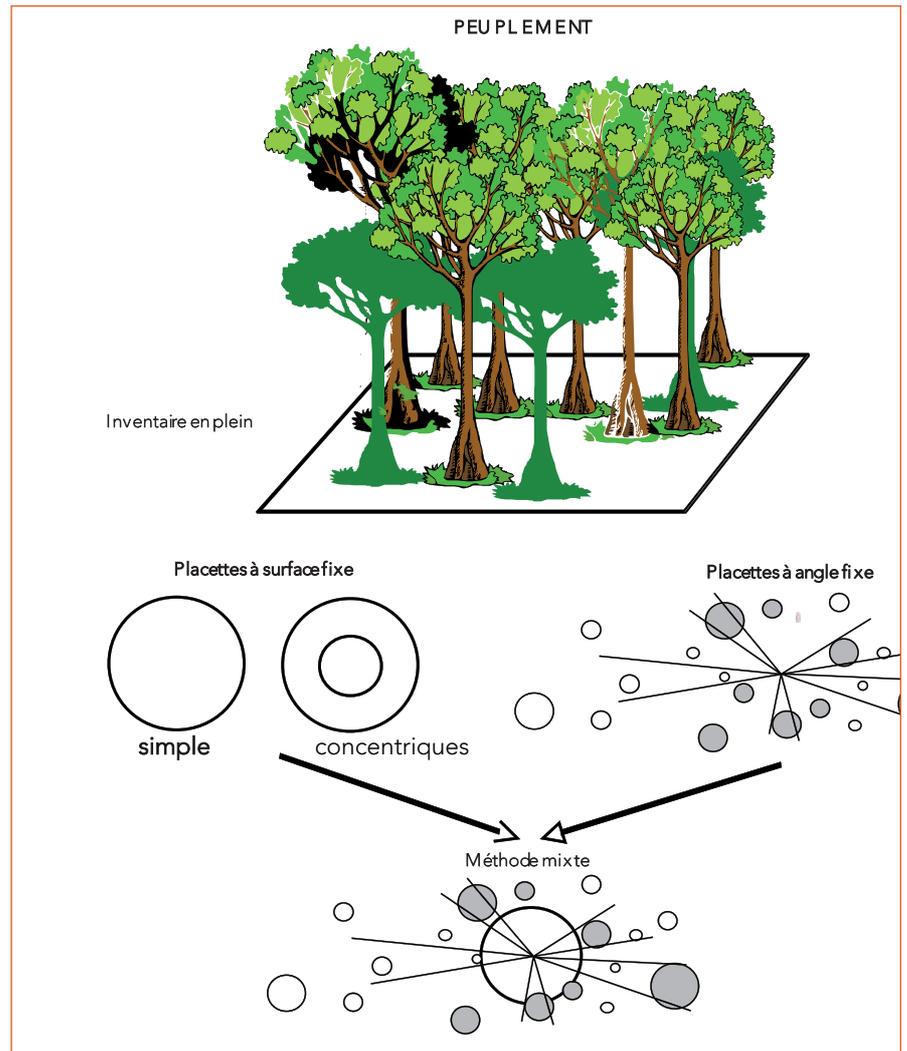


Fig. 2 : méthodes d'estimation de la surface terrière d'un peuplement

adultes, nécessitent une implantation rigoureuse (Duplat et Perrotte 1981, pp. 56-61). L'ensemble des circonférences (ou diamètres) des arbres est mesuré sur chaque placette. Cette approche est celle privilégiée par exemple lors de la réalisation des diagnostics Sylvie dans les peuplements réguliers (Gauquelin et al. 1995). On notera également l'existence de méthodes basées sur l'implantation de placettes à surfaces fixes concentriques (plusieurs sous-placettes circulaires emboîtées). Dans ce cas, les mesures sur les petits diamètres se restreignent aux sous-placettes de petite surface. Un des avantages de cette méthode est d'adapter l'effort d'échantillonnage selon les densités des différentes catégories de diamètre.

Le cas du tour d'horizon relascopique

Dans le cas des placettes à angle fixe, la mesure de surface terrière se fait grâce à l'utilisation d'un angle de visée ou facteur (méthode dite de l'angle critique). Il existe, sur les appareils actuels (relascopie de Bitterlich, prisme relascopique, planchette relascopique...), une ou plusieurs valeurs d'angles de visée ou facteurs. On montre (page 63 du manuel Inventaire de l'ONF) que la mesure de la surface terrière à l'hectare ne dépend que de l'angle (ou facteur de l'appareil utilisé) et du nombre de tiges vues sous cet angle. Sur chaque point d'arrêt, l'opérateur fait un tour d'horizon relascopique, c'est-à-dire qu'il effectue un tour complet sur lui-

même en visant chaque tige pré-comptable au niveau 1,30 m, sous l'angle correspondant à l'appareil choisi (voir encadré 3 ; Marchal et Rondeux 1995). Toutes les tiges de diamètre apparent suffisant (c'est-à-dire supérieur à l'angle horizontal fixé) sont comptabilisées, éventuellement distinguées selon l'essence et la catégorie de diamètre. Le nombre obtenu N est alors multiplié par le facteur de surface terrière FST (1, 2 ou 4) et donne une estimation ponctuelle de la surface terrière à l'hectare :

$$G \text{ (m}^2\text{/ha)} = N \times FST$$

Le choix du facteur par l'opérateur, qui doit être fixé avant inventaire, dépend de la densité présumée des tiges sur les points d'observation sachant qu'il est souhaitable de prendre en compte 15 à 20 tiges par point (minimum 10 à 12 ; cette consigne vaut également pour les placettes à surface fixe) pour avoir une mesure fiable (voir tableau 1).

À noter que, pour les placettes à angle fixe, la mesure du diamètre des arbres apparents est nécessaire pour estimer une densité (le tour d'horizon relascopique seul ne permet pas une telle estimation !). Toutefois, il est préférable d'utiliser des placettes à surface fixe pour construire des histogrammes en nombre de tiges par classe ou catégorie de diamètre. La méthode à angle fixe présente en général un grand intérêt lorsqu'il s'agit d'estimer précisément la surface terrière des catégories de diamètre gros bois et très gros bois. Il s'agit également d'une méthode efficace pour réaliser des diagnostics rapides de peuplements dans le cas où seule la surface terrière est recherchée (Jarret 2004).

À noter l'existence d'une méthode mixte couplant placette à surface fixe et placette à angle fixe, la première étant généralement dédiée à l'inventaire des petits diamètres (perches et petits bois) et la

2 - Appareils de mesure de la surface terrière (placettes à angle fixe)

Il existe deux types de petits matériels, soit **par encoche**, soit **par dispositif optique** :

Matériels à encoche :

- planchette à chaînette-avec différentes encoches (facteurs 1/2, 1 ou 2) :
- encoche sur dendromètre Suunto (facteur 1),
- « porc-épic » ou porte-encoches (facteur 1, 2 ou 4) à têtes interchangeables.

Matériels à dispositif optique :

- prisme relascopique (facteur 1, 2 ou 4) avec un facteur par prisme
- relascope de Bitterlich (facteurs 1, 2 ou 4 par lecture de bandes)

Les moins onéreux sont les appareils à encoches mais ils demandent de bien s'étalonner. Attention à l'utilisation des têtes « porc-épic » pour les pentes (erreurs dues à l'utilisation de fourchettes de pente). Les dispositifs optiques offrent un confort de visée donc de fiabilité mais le jeu d'ombre et de lumière en forêt est parfois gênant pour leur utilisation.



Relascope à encoches ONF



Relascope à encoches porc-épic



Prismes relascopiques



Relascope de Bitterlich

Appréciation de la densité	Très peu dense TSF ruinés...	Peu dense (TSF...)	Dense	Très dense « hêtraies cathédrales »
Surface terrière – G – présumée	< 5 m ² /ha	5 à 20 m ² /ha	20 à 35 m ² /ha	> 35 m ² /ha
Facteur FST recommandé*	Pas de tour relascopique	1	2	4
Valeur de l'angle horizontal	-	1/50	√2/50	2/50

* certains appareils ont un facteur 0,5 pour les tiges de sous-étage, facteur peu usité

Tab. 1 : choix du facteur de surface terrière FST en fonction du peuplement

3 - Mesure de surface terrière par un système à encoche

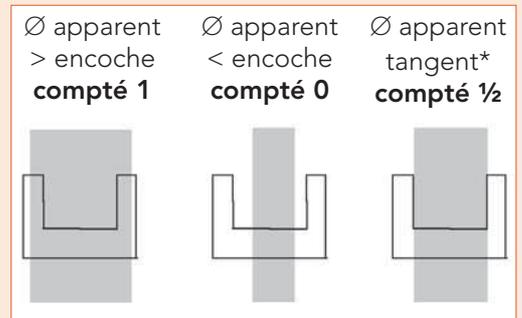
On compte le nombre d'arbres dont le tronc vu par l'observateur débordé l'encoche.

* Remarque : les arbres tangents sont souvent comptés pour ½ mais en toute rigueur il faudrait vérifier le diamètre de l'arbre et sa distance au point de mesure avec correction de pente si nécessaire (voir encadré 5) ; l'opérateur doit "se forcer" à prendre une décision, plutôt que de choisir 1/2 par facilité.

Pour obtenir une surface terrière fiable, il faut :

- avoir une bonne visibilité : en présence de végétation abondante (souille, taillis et régénération), réaliser les mesures hors feuilles ; sinon la surface terrière est sous estimée (risque très élevé de ne pas voir les plus gros arbres les plus éloignés) ;
- viser à 1,30 m ; or un opérateur dont l'œil est à 1,60 m au-dessus du sol a « naturellement » tendance à viser ce niveau au lieu « descendre » à 1,30 m, ce qui entraîne un biais négatif dont la valeur dépend de la décroissance moyenne du peuplement ;
- ne pas oublier l'arbre le plus proche (cas fréquent), les arbres cachés, les arbres lointains (gros diamètres) ;
- avoir une grande rigueur visuelle dans l'appréciation du seuil minimum de prise en compte (ex. 17,5 cm) ;
- respecter la longueur de la chaînette (ne pas la remplacer par une ficelle dont la longueur peut varier) ;
- positionner correctement l'appareil pour la mesure ;
- garder même point de visée (pas de déplacement) ;
- veiller au risque de confusions entre FST 1 et 2 pour le système à porte-encoches ;
- bien mémoriser ou, mieux, repérer le début du tour d'horizon relascopique ;
- veiller aux problèmes d'accommodation visuelle de certains utilisateurs, notamment en fin de journée ou pour les porteurs de lunettes ;
- vérifier périodiquement le matériel, surtout s'il passe d'une main à l'autre : pointes des encoches non cassées, longueur de la chaînette, propreté du prisme.

La mesure est sans biais dans ces conditions... et pour des observateurs expérimentés d'où la nécessité de **s'étalonner et**



se contrôler à intervalles réguliers par l'intermédiaire de :

- terriéroscopie : placettes servant de contrôle et où la surface terrière a été calculée à partir des mesures des diamètres et des distances
- comparaison entre observateurs sur un même inventaire.
- contrôle de certains diamètres au compas en cas de classement par catégories PB, BM et GB ; en général les GB sont sous estimés car les oublis des tiges éloignées sont plus fréquents. La ventilation à vue par classe de diamètre est à proscrire absolument !

deuxième dédiée à l'inventaire des catégories supérieures de diamètre (bois moyens, gros bois). Cette méthode est souvent employée dans les futaies irrégulières où toutes les classes de diamètre sont présentes au sein d'un même peuplement élémentaire.

Quelle que soit la méthode employée, il est nécessaire d'implanter plusieurs placettes (de manière systématique ou aléatoire)

sur la surface d'inventaire pour obtenir une estimation correcte de la surface terrière. Plus le peuplement est hétérogène (variation importante des structures sur la surface d'inventaire) et plus le nombre de placettes et (ou) la surface de ces placettes doit être important(e) pour une estimation satisfaisante de la surface terrière totale (voir encadré 4). Une ventilation précise de la surface terrière par catégorie de diamètre conduit également à un

effort d'échantillonnage plus important. Par exemple, pour les forêts communales de Prénovel et Les Piards dans le Jura (surface de 579 ha, futaie jardinée), un réseau de 139 placettes permanentes à surface fixe et de rayon 17 m permet d'estimer la surface terrière totale avec une erreur relative de 6 % et les surfaces terrières des catégories petits bois, bois moyens, gros bois et très gros bois avec des erreurs relatives respectives de

27 %, 28 %, 29 % et 43 % ; une estimation précise de la surface terrière des gros bois (erreur relative inférieure à 15 %) aurait exigé l'implantation de 525 placettes ! On veillera également à ne pas oublier les corrections liées à la pente (voir encadré 5 pour les mesures de surfaces terrières au relascope). Certaines de ces corrections présentent des biais qu'il est important de connaître. À cette occasion, il faut rappeler que le relascope de Bitterlich est un appareil de mesure efficace en cas de besoin de corrections de pente.

La surface terrière : pour quoi faire ?

Les premières questions à se poser sont : pourquoi ai-je besoin de la surface terrière ? Est-ce une valeur moyenne pour le peuplement ou la forêt qui m'intéresse ou est-ce une notion de variabilité ? Si c'est une moyenne qui m'intéresse, quelle est la précision désirée ? Si c'est une variabilité, quelle est la surface locale pertinente de mesure de la surface terrière ? Suis-je dans une optique de simple évaluation à un instant donné ou suis-je dans une optique de suivi ?

Répondre à de telles questions nécessite une analyse fine des objectifs et des moyens disponibles. La connaissance de la surface de référence à inventorier ou estimer est un préalable indispensable. Elle doit être parfaitement connue et délimitée sur un plan (parcelle, groupe de parcelle, forêt). La plupart des gestionnaires s'intéressent davantage aux valeurs moyennes de la surface terrière (ex. surface terrière sur la parcelle) mais il est parfois intéressant d'en connaître la variabilité spatiale (ex. cas de certaines typologies de peuplement) ou temporelle (ex. dynamique des peuplements). Le choix de la surface locale de mesure adaptée dépend alors du processus qui nous intéresse (relation surface terrière et régénération) ou de la structure élé-

mentaire jugée pertinente (peuplement élémentaire dans les typologies de structure). Le choix d'une évaluation à un instant donné ou d'un suivi relève plutôt de la méthode d'inventaire elle-même : placettes temporaires (inventoriées une seule fois), placettes permanentes (inventoriées plusieurs fois dans le temps), combinaison placettes permanentes/placettes temporaires.

La surface terrière d'un peuplement est de plus en plus utilisée dans les actions du sylviculteur et supplante même l'utilisation du volume dans certains cas. Elle est souvent utilisée comme :

- a) référentiel sylvicole dans les futaies adultes ;
- b) indicateur dendrométrique du capital sur pied ;
- c) unité pour les prélèvements lors des passages en coupe (en évitant les pièges des tarifs de cubage) ;
- d) nouvel outil typologique à la disposition du sylviculteur.

a) Quelques **référentiels sylvicoles** s'expriment désormais en surface terrière plutôt qu'en nombre de tiges pour les futaies adultes (Jarret 2004). La surface terrière peut en effet servir de référence en terme de capital sur pied s'il existe des tables de production spécifiques pour une espèce et une fertilité donnée avec prise en compte de l'âge en entrée.

b) Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la surface terrière utilisée comme **indicateur dendrométrique de capital sur pied** ne peut s'envisager qu'en association avec d'autres variables. Elle ne peut être utilisée seule pour comparer des peuplements entre eux. Par ailleurs, un seul tour d'horizon relascope ne permet pas de caractériser proprement la surface terrière d'un peuplement (qui plus est hétérogène) puisqu'il s'agit d'une estimation ponctuelle de surface terrière à l'hectare à laquelle

on ne peut adjoindre aucun intervalle de confiance.

c) En se basant sur les accroissements en surface terrière des peuplements estimés par l'IFN ou calculés au plus juste par comparaison d'inventaires, il est possible de déduire un **prélèvement** idéal (comme avec le volume) à réaliser en tenant compte de l'effort de capitalisation ou de décapitalisation et de la rotation préconisée. Ceci permet de s'affranchir de l'estimation de la hauteur, toujours difficile, qui conduit souvent à une mauvaise estimation du volume et à des comparaisons délicates entre peuplements.

d) L'**outil typologique** se base en général sur une ventilation de la surface terrière des tiges précomptables dans les différentes catégories de diamètre au niveau de chaque placette d'inventaire (certaines typologie, comme la typologie feuillue de Franche-Comté, s'appuie en partie sur une ventilation en nombre de tiges). À partir de ces différentes mesures, il est possible de définir un type soit à partir d'un triangle des structures, soit à partir d'une clé typologique. Il s'agit d'un outil descriptif utile au moment de l'aménagement pour déterminer les zones homogènes d'un point de vue structure, notamment dans les peuplements hérités d'anciens taillis sous futaie (structures complexes).

Conclusions

La surface terrière est largement utilisée dans les domaines de la recherche et de la gestion forestière. Et pour cause, il s'agit d'une variable facile à estimer dans le cadre d'inventaires en plein ou d'inventaires statistiques car basée sur la mesure de diamètres ou circonférences, ou sur l'emploi d'appareils simples d'utilisation. Elle permet en outre le calcul de variables ayant un réel sens écologique ou le calcul de volumes utiles au gestionnaire.

4 - Détermination du nombre de placettes à mettre en place pour l'estimation de la surface terrière totale

Dans le cadre de **diagnostics sylvicoles** (type Sylvie ou par tour d'horizon relascopique), l'objectif n'est pas forcément d'obtenir une très bonne précision pour l'estimation de la surface terrière. Mais le résultat sera d'autant plus fiable que la zone considérée sera homogène : une bonne connaissance du terrain ou une visite préalable permettra d'établir un

Peuplement	Nombre de points de mesure
Très homogène	5 à 6
Assez homogène	7 à 10
Peu homogène	11 à 15

Tab. 2 : nombre de points de mesure selon l'homogénéité du peuplement, pour un diagnostic sylvicole

cheminement comportant le nombre de points de mesures nécessaire et suffisant dans la zone retenue du peuplement. On se limitera dans ces conditions à un nombre de points proche de la dizaine, compris entre 5 et 15 suivant l'homogénéité du peuplement (tableau 2). Par exemple, un peuplement de douglas de 8 ha installé sur deux stations de fertilités proches fera l'objet d'une série de 7 à 10 points de mesure ; un peuplement de hêtre de 4 ha avec des hauteurs variables sur l'ensemble nécessitera 11 à 15 points de mesure. On peut donc avoir le même nombre de points pour des surfaces très différentes.

Dans le cadre d'un **inventaire par échantillonnage concernant un groupe de parcelles, une série ou une forêt**, l'exigence de précision est souvent plus prégnante et il est donc important de mieux raisonner l'effort d'échantillonnage. Pour le déterminer il est nécessaire au préalable de fixer la précision recherchée (ex. 10 %) et d'avoir une idée *a priori* de la

variabilité de la surface terrière, exprimée par le coefficient de variation $CV = \sigma/m$ où m est la moyenne et σ l'écart type de cette surface terrière. Pour apprécier la variabilité, on peut s'appuyer sur des données IFN, d'anciens inventaires ou des études concernant directement la forêt où des forêts similaires proches ; à défaut, on peut faire quelques mesures préalables (placettes à surface fixe ou angle fixe).

À partir du coefficient de variation, il est possible de déterminer (manuel Inventaire de l'ONF, Duplat et Perrotte 1981 pp. 73-74) le nombre minimum de placettes nécessaires pour obtenir l'erreur relative (ou précision) souhaitée, comme indiqué au tableau 3. Ce nombre doit ensuite être adapté de façon pragmatique à la géométrie du dispositif d'échantillonnage et traduit en une densité d'échantillonnage « parlante » (ex. : 2 placettes/ha ; 1 placette tous les 5 ha).

Par expérience, la surface terrière présente en général un coefficient de variation inférieur à 50 % pour des placettes à surface fixe ou angle fixe classiques, le plus souvent autour de 30 %. En l'absence de données et pour des peuplements jugés hétérogènes, on peut par précaution prendre un nombre de placettes correspondant à un coefficient de variation de 40 %. Dans le cas de peuplement jugés homogènes, la référence de 25 % semble raisonnable.

Il est important de noter que si d'autres variables que la surface terrière sont recherchées, c'est bien évidemment la plus contraignante sur le plan de la précision et de l'enjeu qui définit la densité d'échantillonnage finale. Enfin, la stratification (découpage de la surface d'inventaire en zones homogènes) peut conduire à améliorer nettement la précision de l'estimation si les différences entre strates (ou blocs) sont importantes.

Er (%)	CV (%)						
	20	25	30	35	40	45	50
5	64	98	140	191	248	314	387
10	18	26	37	49	64	80	98
15	9	13	18	23	30	37	45
20	6	8	11	14	18	22	26

Tab. 3 : nombre théorique de placettes à implanter pour une erreur cible et une variabilité données

Applicable dans le cadre de référentiels de gestion, de typologies de peuplements, elle fait l'objet actuellement d'un engouement de plus en plus important de la part des gestionnaires. Cet engouement, mérité, ne doit pas faire oublier certains écueils comme une interprétation sim-

pliste des valeurs de surface terrière lors des diagnostics de peuplement.

Thomas CORDONNIER
Mien TRAN-HA
ONF, direction technique
département recherche

Jérôme PIAT
ONF, DT Ile-de-France — Nord-Ouest
direction forêt

Didier FRANÇOIS
ONF, DT Franche-Comté
direction forêt

5 - Corrections de pente pour les mesures de surface terrière au relascope

La formule de détermination de la surface terrière G (m^2/ha) par mesure au relascope est la suivante :

$$G = k.N$$

où N représente le nombre de tiges comptées par la méthode du relascope (voir encadré 3) et k le facteur relascope. Soit $R_1(d)$ la distance limite (en mètres) de comptage d'un arbre de diamètre d (en mètres) pour une surface horizontale. On a :

$$R_1(d) = \frac{50d}{\sqrt{k}}$$

En cas de pente, nous disposons de deux méthodes pour le calcul de la surface terrière du peuplement.

1/ L'appareil (ex. relascope de Bitterlich) effectue automatiquement la correction de l'angle apparent. Dans ce cas la surface terrière mesurée ne doit pas être corrigée. En revanche, lorsqu'on veut vérifier si l'arbre doit être compté ou non il est nécessaire que la distance mesurée R (en mètres) entre l'arbre et l'individu soit telle que :

$$R < \frac{R_1(d)}{\cos(\beta)}$$

où β correspond à la valeur de la pente dans la direction de visée de cet arbre. Il est possible de construire des abaques permettant de déterminer R pour différentes valeurs de d et de β .

2/ L'appareil ne modifie pas l'angle apparent. Dans ce cas, c'est lors du calcul de G que se fait la modification car la surface horizontale projetée n'est plus un cercle mais une ellipse. Soit α l'angle de plus grande pente. On obtient :

$$G = \frac{k.N}{\cos(\alpha)}$$

Pour vérifier si l'arbre doit être compté ou non il est nécessaire que la distance mesurée R (en mètres) entre l'arbre et l'individu soit telle que :

$$R < R_1(d)$$

À noter cependant que ce procédé suppose une pente régulière sur l'ensemble de la placette. Lorsque la pente est irrégulière, seul le relascope de Bitterlich est adapté. Certains dendromètres (ex. porc-épic) proposent des encoches adaptées à une fourchette de pentes données. Ces appareils induisent un léger biais positif sur la mesure de la surface terrière.

Bibliographie

BRUCIAMACCHIE M., DE TURCKHEIM B., 2005. La futaie irrégulière : théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Aix-en-Provence : Edisud. 286 p.

DUPLAT P., PERROTTE G., 1981. Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers. Fontainebleau : ONF. 432 p.

GAUQUELIN X., TRAN-HA M., VALLANCE M., 1995. Des logiciels de diagnostic sylvicole des jeunes peuplements sur micro-ordinateur (PC). Bulletin Technique, n° 28, pp. 49-54

JARRET P., 2004. Chênaie atlantique. Coll. « Guide des sylvicultures ». Paris : ONF. 335 p.

MARCHAL D., RONDEUX J., 1995. Comment estimer la surface terrière d'un peuplement ? Coll. « Fiches

techniques », n° 3. Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. 2 p. <en ligne : <http://www.fsagx.ac.be/gf/Fiches%20techniques/N%B03.pdf>>

PIBOULE A., 2005. Influence de la structure du peuplement forestier sur la distribution de l'éclaircissement sous couvert. Cas forêt hétérogène feuillue sur plateau calcaire. Thèse de Doctorat, ENGREF, 147 p.

SCHÜTZ J.P., 1997. Sylviculture 2 : la gestion des forêts irrégulières et mélangées. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 192 p.

SIMON E., LEGOFF N., OTTORINI J.M., 2007. Les interventions sylvicoles dans la hêtraie adulte : connaissances sur la croissance en grosseur. Rendez-vous techniques, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises », pp. 67-75

SONOHAT G., BALANDIER P., RUCHAUD F., 2004. Predicting solar radiation transmittance in the understorey of even-aged coniferous stands in temperate forests. Annals of Forest Science, vol. 61, n° 7, pp. 629-641

TRAN-HA M., PERROTTE G., CORDONNIER T., DUPLAT P. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. Revue Forestière Française, sous presse

VALLÉE P., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. Forest Ecology and Management, vol. 229, n° 1-3, pp. 98-110

ZEIDE B., 2005. How to measure stand density. Trees, vol. 19, n° 11, pp. 1-14

Dossier



Gestion des futaies hétérogènes

A l'automne 2005, nous avons consacré aux futaies hétérogènes un premier dossier qui exposait les principes de base, les nouvelles orientations en cours et le point de vue des chercheurs. Nous y revenons aujourd'hui avec d'abord un regard sur méthodes d'étude, un aperçu des dispositions prévues pour les chênaies continentales, et des exemples concrets et variés de sylviculture en irrégulier : évolution de l'emblématique futaie jardinée Franc-Comtoise, futaie irrégulière continue et proche de la nature en forêt privée, conversion des TSF en Haute-Marne et sylviculture de montagne pour la protection.

La question fondamentale de l'aménagement forestier n'est pas oubliée... mais reportée à un prochain numéro.

- p. 18 Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation et modélisation
par Thomas Cordonnier, Christian Ginisty, François Ningre, Thomas Pérot, Alexandre Piboule,
Isabelle Vinkler

- p. 26 La sylviculture des chênaies continentales en futaie irrégulière par Thierry Sardin

- p. 33 L'expérience jurassienne en futaie jardinée résineuse et mixte par Vincent Augé

- p. 39 Martelages en forêts de Thiérache par Brice de Turckheim

- p. 45 Conversion en futaie irrégulière en Haute-Marne - L'expérience de l'unité territoriale d'Auberive
par Jean-Jacques Boutteaux

- p. 52 Sylviculture des forêts à rôle de protection – Les apports du guide pour les Alpes du nord
françaises par Xavier Gauquelin, Benoît Courbaud, Jacques Fay et Frédéric Berger

Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation et modélisation

Le précédent dossier sur les forêts hétérogènes (Rendez-Vous Techniques n° 10) s'est principalement focalisé sur les enjeux des forêts hétérogènes et les grands principes de leur gestion. Quelques exemples exposés de manière succincte illustrent les recherches scientifiques en cours au niveau national, les différentes approches de gestion et les orientations prises au sein de l'ONF, en dégagant les traits saillants d'une problématique complexe. Une suite logique consiste à développer maintenant de manière plus détaillée un certain nombre de travaux pour alimenter les réflexions et permettre aux lecteurs avertis de mieux s'appropriier les concepts. Dans cet article, nous examinerons trois exemples correspondant à autant d'approches différentes (non exhaustives) :

- une approche basée sur des **observations** avec la présentation d'une étude ONF/INRA sur la morphologie de perches de hêtre en système irrégulier ;
- une approche basée sur l'**expérimentation** avec la présentation d'un projet de recherche INRA sur le mélange érable sycomore/hêtre en Lorraine ;
- une approche par **modélisation** avec la présentation des recherches du Cemagref sur les mélanges chêne sessile/pin sylvestre dans la région Centre.

Ces travaux étant en cours, il ne sera pas question ici de présenter des résultats définitifs mais bien de préciser l'intérêt des différentes approches et les méthodes asso-

ciées. Un objectif commun à toutes ces études vise à améliorer notre capacité à prédire la dynamique et la stabilité des mélanges ou des structures irrégulières en fonction de la sylviculture appliquée.

Une étude sur la morphologie des perches de hêtre en futaie irrégulière

Un objectif à long terme : définir des indicateurs de bonne réactivité des perches

La recherche d'éléments de diagnostic des perches ($7,5 \leq$ diamètre $< 17,5$ cm) permettant de prédire leur dynamique de croissance et leur évolution qualitative sous l'effet d'une éclaircie est depuis quelque temps une préoccupation forte des gestionnaires en forêt hétérogène. Elle est d'ailleurs commune à toutes les sylvicultures d'arbres qui supposent de repérer les tiges de qualité, parfois même très précocement, afin de travailler à leur profit. En système irrégulier cette question est le plus souvent formulée en termes de durée pendant laquelle une espèce peut rester en phase d'attente ou de compression sans que son avenir soit remis en cause. Le forestier ne peut raisonnablement accéder à l'historique de croissance d'une perche ou d'un petit bois. Il est en revanche capable d'appréhender sur le terrain un certain nombre de variables morphologiques simples : proportion de houppier vivant, caractéristiques de la branchaison, fourchaison, présence de gourmands, déséquilibre du houppier, état sanitaire. L'objectif de

cette étude est d'améliorer la prédiction à court terme (5-8 ans) de la réactivité de perches, en croissance et qualité, au sein de peuplements feuillus après réduction de la compétition locale. La première étape consiste à définir des morphotypes sur lesquels une expérimentation de libération pourra être envisagée par la suite. Cette première étape descriptive est pilotée par l'ONF, réalisée en partenariat avec l'INRA (LERFoB, Unité Mixte de Recherche INRA/ENGREF, Champenoux), et financée dans le cadre du projet ECOGER¹. À noter qu'il existe, pour les feuillus et contrairement aux résineux, un réel manque de connaissance sur les relations entre itinéraires sylvicoles (historique) et architecture aérienne des tiges et sur leurs conséquences en termes de réactivité (croissance et qualité) après éclaircie.

Une méthodologie ambitieuse pour aboutir à des morphotypes

Plus de 800 perches de hêtre réparties dans 12 parcelles (dont 2 en forêt privée) de 11 forêts du Nord de la France (futaies irrégulières, anciens taillis-sous-futaie en conversion) ont été décrites suivant un protocole de description assez complet (figure 1) : hauteur totale, circonférence, hauteurs d'insertion et nature des quatre premières branches séquentielles vivantes, hauteur de base du houppier, écart à la verticalité sur quatre mètres, nombre de gourmands sur 4 m etc. Une journée d'inter-calibration entre les différentes équipes de l'INRA et de

¹ ECOlogie pour la Gestion des Ecosystèmes et de leurs Ressources

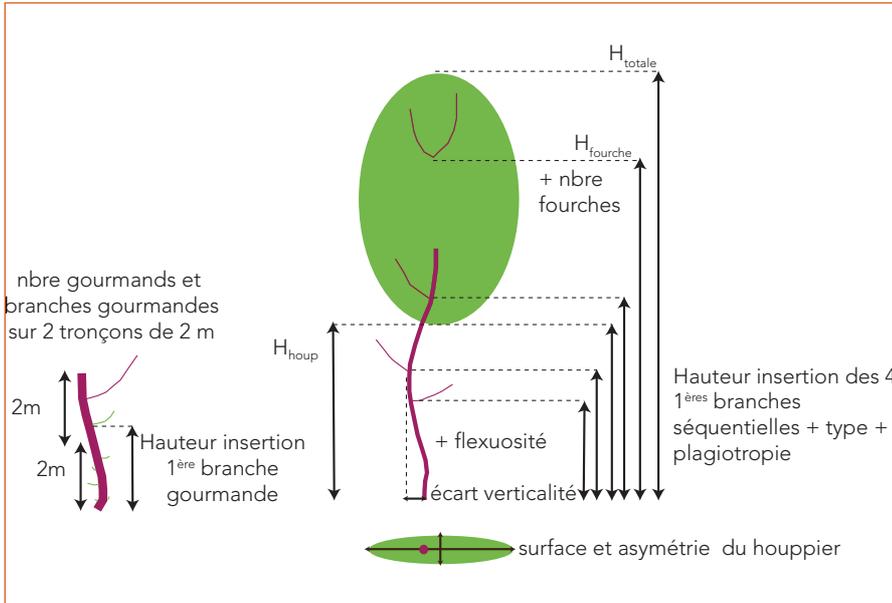


Fig. 1 : variables mesurées sur chaque perche échantillonnée dans le cadre du projet sur la réactivité des perches en système irrégulier

Les données ont été traitées par des méthodes d'analyses descriptives multivariées (Analyse des Composantes Principales, Analyse Hiérarchique Ascendante) pour aboutir aux différents types morphologiques. Un apport intéressant de cette étude a été l'élaboration d'une nouvelle méthode robuste de mesure de hauteur de base de houppier et la mise en place d'une étude parallèle visant à améliorer la distinction entre branches séquentielles et branches gourmandes.

Exemple de résultat

La figure 2 représente la clé typologique obtenue après analyse des données. Un élément frappant de cette clé est le nombre réduit de variables nécessaires à la détermination des types : la proportion de houppier vivant (indice de vigueur), la proportion de la tige présentant des branches isolées sous le houppier (indice d'élagage), la présence d'une fourche sur les 3 premiers quarts de la tige

L'ONF (5 directions territoriales concernées : Centre-Ouest, Ile-de-France Nord-Ouest, Lorraine, Franche-Comté, Bourgogne Champagne-Ardenne) a permis de garantir une bonne homogénéité

des prises de mesures. Les perches ont été sélectionnées de manière aléatoire après inventaire et stratification suivant la typologie Franche-Comté : perches d'avenir, récupérables, douteuses, nulles.

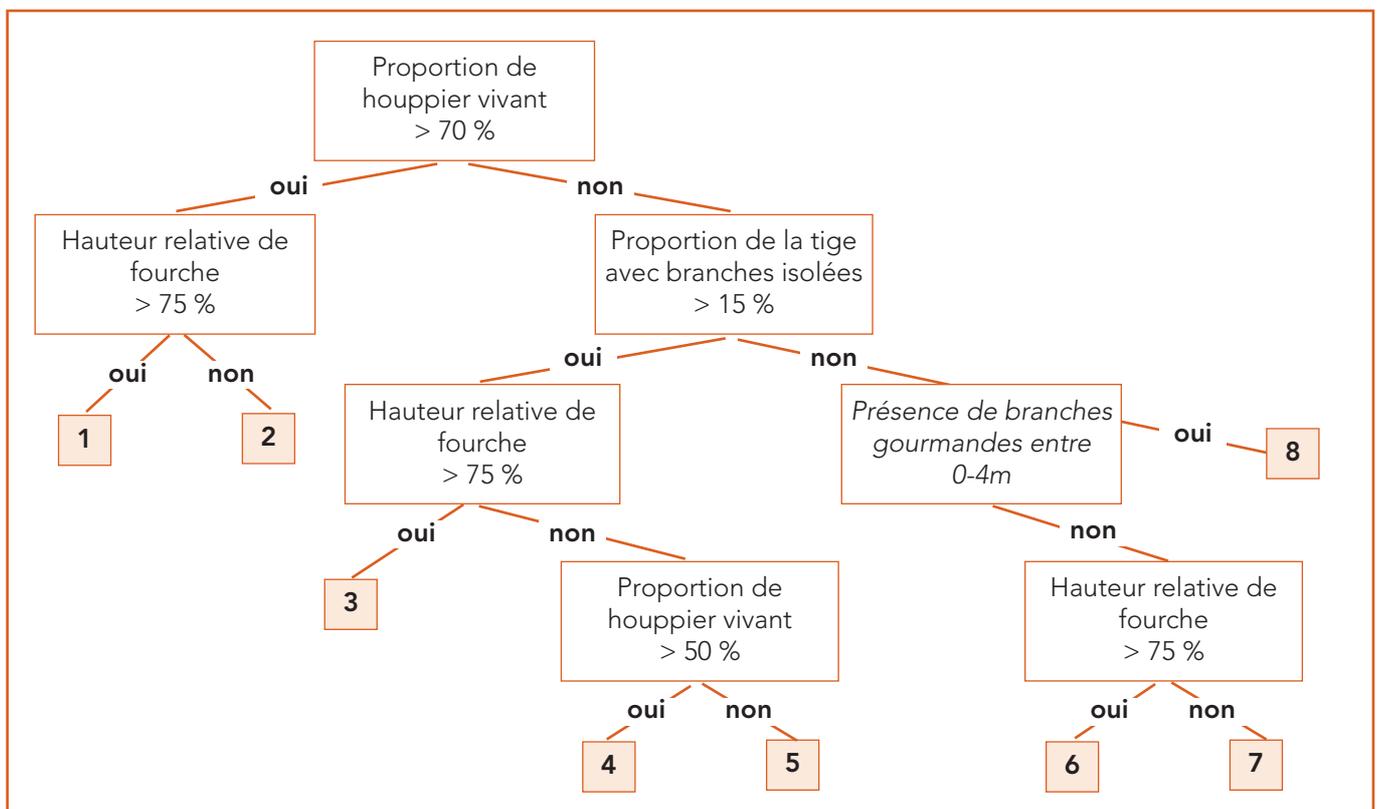


Fig. 2 : résultat de la typologie (morphotypes) issue de l'analyse des données mesurées sur les perches de hêtre

(indice de vigueur), et la présence de branches gourmandes sur les 4 premiers mètres (critère de qualité). Il est également intéressant de noter que ces variables ne nécessitent pas de mesures compliquées sur le terrain, donnant ainsi un caractère pratique à cette clé. Reste à évaluer la manière dont les 8 types ainsi déterminés réagissent à une éclaircie en leur faveur ce qui correspond à la deuxième phase de l'étude qui sera réalisée ultérieurement.

Une recherche expérimentale sur le mélange hêtre/érable sycomore en Lorraine

Un dispositif expérimental original...

Avec le soutien du programme « forêts hétérogènes » du GIP-ECOFOR², l'ONF a mis en place en 1997 une expérimentation sur le mélange hêtre – érable sycomore en forêt domaniale de Haye (Lorraine). Cette expérimentation représente ce qu'on appelle un « double clinal aléatoire » : il s'agit d'une placette rectangulaire d'environ un hectare au sein de laquelle la densité des plants varie dans le sens de la longueur et le taux de mélange dans le sens de la largeur (figure 3). Ce type de dispositif, assez original, permet de réaliser, sur une petite surface, une grande diversité de situations de compétition entre individus d'une même espèce (compétition intraspécifique) et entre individus d'espèces différentes (compétition interspécifique). Sa motivation initiale consistait à mieux comprendre l'influence du voisinage sur la croissance et la forme des individus. La placette est constituée d'une zone centrale de mesure où la position de tous les individus est connue et d'une zone tampon permettant d'éviter d'éventuels effets de bordure. Les arbres de la zone centrale font l'objet de mesures régulières

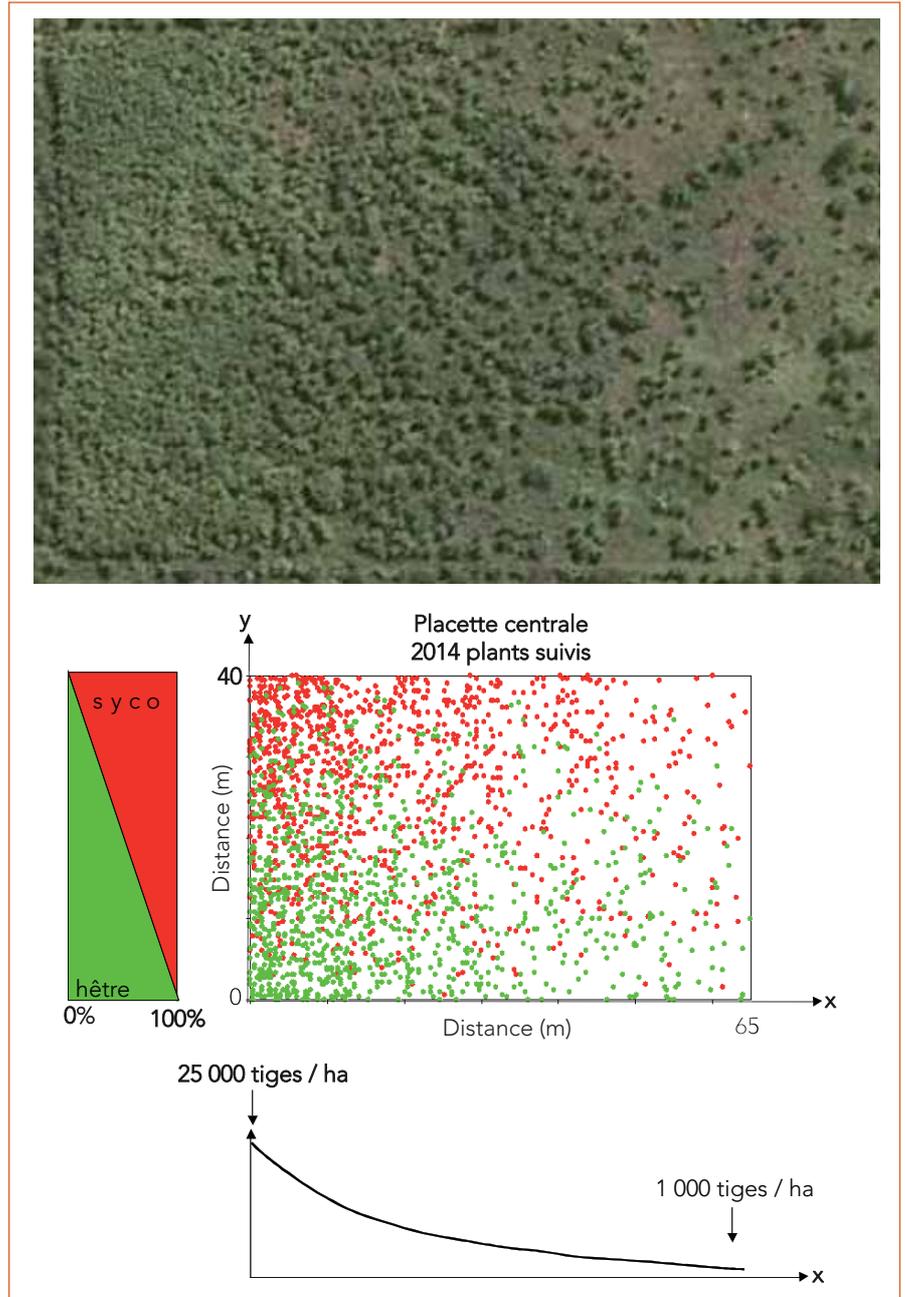


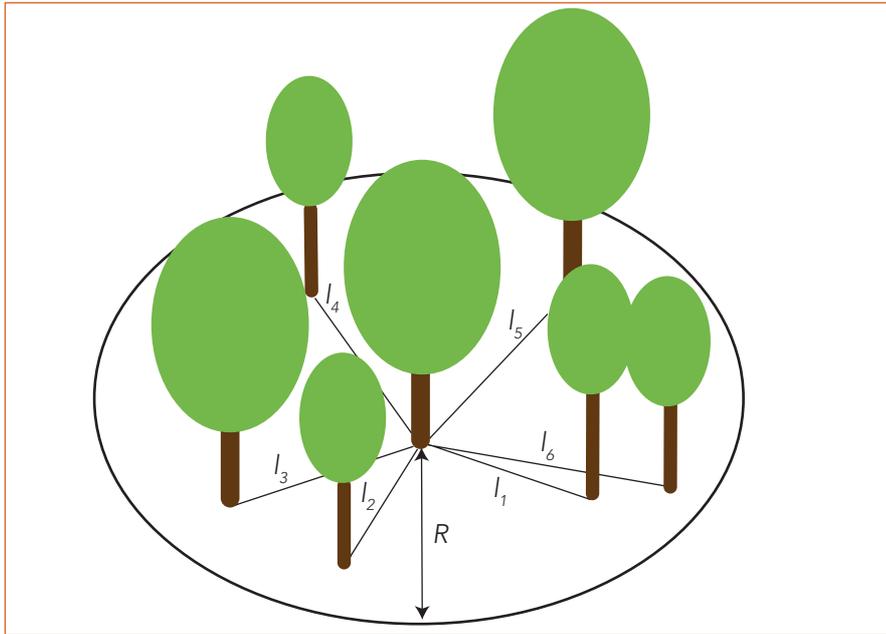
Fig. 3 : plan du dispositif double clinal aléatoire en forêt de Haye (Lorraine) avec une variation linéaire du mélange en ordonnée et une variation hyperbolique de la densité en abscisse.

de hauteur et de circonférence et des mesures plus ambitieuses sur la branchaison sont prévues dans le cadre d'une thèse menée à l'INRA (LERFoB).

... qui répondra à diverses questions scientifiques et de gestion

Une question scientifique importante à laquelle le dispositif du

double clinal peut répondre est celle de la quantification de l'influence de la compétition (densité, espèce) sur le développement des houppiers des semis de hêtre et d'érable (élagage naturel, croissance latérale des branches) et, en corollaire, le degré de détail nécessaire pour évaluer la croissance des tiges en situation de



$$IC_{12} = \frac{1}{D} \left(\frac{D_1}{l_1} + \frac{D_2}{l_2} + \frac{D_3}{l_3} + \frac{D_4}{l_4} + \frac{D_5}{l_5} + \frac{D_6}{l_6} \right)$$

Fig. 4 : exemple d'indice de compétition (indice d'Hegyi, 1974).

Cet indice se calcule sur une placette de rayon R (en général 8 à 12 m) centrée sur la tige cible. On a $IC_R = 1/D \sum_{i=1}^n D_i/l_i$ avec D le diamètre de la tige cible, D_i le diamètre du voisin i et l_i la distance entre ce voisin et la tige cible. Cet indice de compétition, qui possède de nombreuses variantes, est utilisé pour prédire la croissance de tiges en peuplement régulier.

compétition. Les indices de compétition (voir exemple figure 4) sont couramment employés, avec plus ou moins de succès, pour prédire la croissance radiale des individus. L'efficacité de ces indices pourra être évaluée en situation de mélange et on pourra proposer la construction de nouveaux indices plus performants. Les apports pour la gestion portent essentiellement sur une meilleure connaissance des relations de compétition entre deux espèces supposées cohabiter à l'état climacique (Peters 1997). Cela devrait permettre de déterminer les stades de développement, les densités et les types de mélanges (intime ou par bouquets) nécessitant des interventions (dépressage en plein, dépressage ciblé, détourage) au profit de l'une ou l'autre des espèces. Les études envisagées sur le dispositif visent également à alimenter des modèles de croissance qui pourront simuler

des interventions sylvicoles (ex. élagages) aidant ainsi à la mise en place de futurs itinéraires de travaux techniques et sylvicoles dans les peuplements mélangés.

Exemple de résultat

La figure 5 illustre un premier résultat obtenu en divisant la placette du double clinal en 25 secteurs, ce qui permet de calculer la moyenne et l'écart type des diamètres des tiges pour cinq densités et cinq types de mélanges différents. Outre le résultat classique de la diminution du diamètre moyen en fonction de la densité, on observe clairement une augmentation de ce diamètre, pour une même densité, lorsque la proportion de plants d'érable augmente. S'il est encore trop tôt pour en tirer des conclusions, en particulier pour identifier les mécanismes mis en cause, cela indique en tout cas une différenciation de la croissance des espèces en fonction de la composition de leur voisinage.

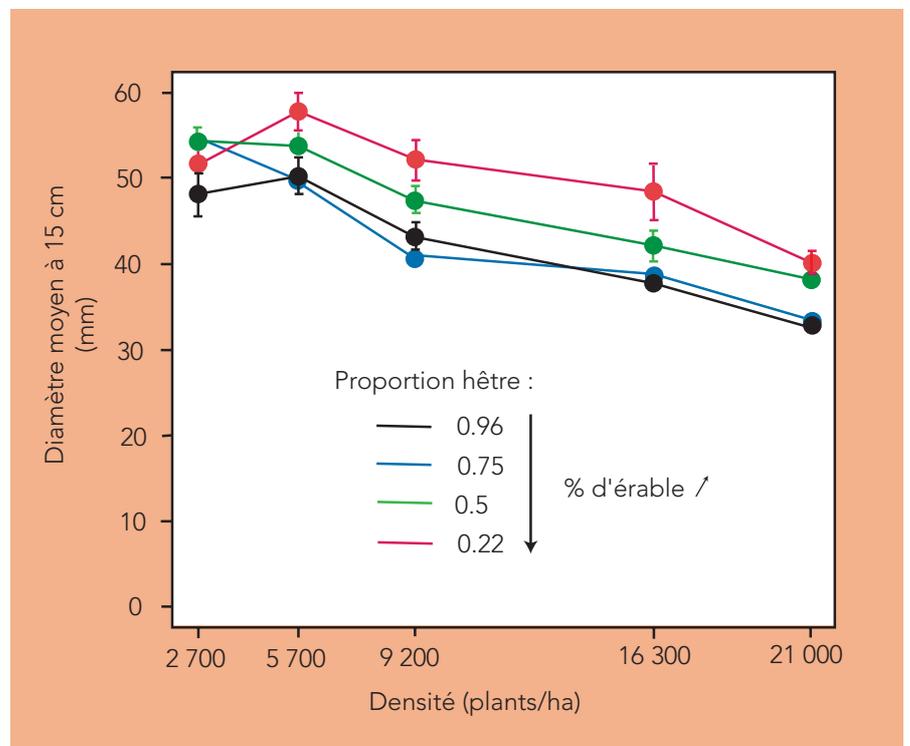


Fig. 5 : relation entre la densité de plants et le diamètre moyen à 15 cm de hauteur des plants de hêtre selon la proportion d'érable dans le voisinage

Intérêt de l'approche expérimentale comparée à la simple observation de mélanges naturels existants

Dans le domaine de la recherche, il est classique d'opposer, pour faire simple, trois approches quantitatives : une approche par observation ou descriptive, une approche par observations structurées et une approche par expérimentation. L'approche par simple observation consiste à déterminer ou estimer une grandeur (ex. surface terrière) en un lieu donné à un moment donné sans en attendre de généralisation. On citera, par exemple, le cas d'une estimation de la densité de régénération d'une parcelle par la mise en place de placettes. Cette estimation de la densité ne saurait, sans autre information, donner une quelconque idée de la densité de semis de parcelles en régénération voisines. L'approche par observations structurées consiste à réaliser des estimations de grandeurs en vue de comparer des objets, par exemple comparer le taux de mélange de peuplements de même âge d'une même région soumis dans le passé à des types de gestion contrastés. L'avantage des observations structurées est qu'elles permettent une meilleure généralisation des résultats sans toutefois pouvoir mettre en évidence de réels liens de cause à effet entre facteurs. Dans notre exemple on ne pourrait ainsi affirmer qu'une différence significative observée entre les deux ensembles de peuplements serait due aux différences constatées entre les sylvicultures pratiquées. L'apport fondamental de l'approche expérimentale, méthode scientifique consistant à tester par des expériences répétées la validité d'une hypothèse, est qu'elle permet justement de mettre en évidence des relations causales. Dans le cas du double cli-



Yann Dumas, Cemagref Nogent

nal, les effets de la densité et du mélange sur l'élagage naturel des tiges de hêtre et d'érable pourront ainsi être distingués et quantifiés.

La modélisation des mélanges chêne sessile - pin sylvestre dans la région Centre

Deux projets pour comprendre la dynamique de peuplements à structure complexe

En France, les formations mélangées chêne sessile — pin sylvestre (au sens de l'IFN : aucune des essences ne forme plus de 75 % du couvert relatif) occupent un peu plus de 50 000 ha, principalement dans la région Centre. Les structures, héritées d'anciens taillis-sous-futaie enrichis en pin sylvestre, se révèlent aujourd'hui très diversifiées, tant au niveau des dimensions des arbres (diamètres, hauteurs) qu'à celui du mélange. Les connaissances sur la dynamique de ces mélanges sont fragmentaires, posant de grandes difficultés pour leur gestion. Quelle est la pérennité de

ces mélanges ? Quels sont les traitements adaptés ? Quels itinéraires doivent être appliqués ? Ces questions ont été traduites dans un projet scientifique de recherche par l'équipe « Sylviculture et modélisation » du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson. Le massif de Lorris de la forêt domaniale d'Orléans représente leur principal support d'étude. Le dernier aménagement du massif prévoit la création d'une série expérimentale ayant pour objectif l'amélioration des connaissances sur la dynamique des peuplements hétérogènes en fonction des sylvicultures appliquées. Par ailleurs, l'aménagement a individualisé un groupe d'amélioration A3 de 1 300 ha constitué des peuplements mélangés chêne sessile — pin sylvestre avec l'objectif de maintenir autant que faire se peut ce mélange. La voie d'étude privilégiée par cette équipe est celle de la modélisation avec l'émergence en particulier de deux projets de thèse plus ou moins avancés : (i) la construction d'un modèle de structure per-

mettant de simuler de manière réaliste des peuplements complexes à partir de données simples de peuplements, (ii) l'élaboration d'une famille de modèles à différentes échelles adaptés aux peuplements mélangés chêne-pin de la région Centre. Outre ces thèses, l'équipe a installé et suit un réseau de dispositifs et a engagé des études de la régénération sous couvert selon les niveaux de lumière et de concurrence des arbres et de la végétation.

Le premier projet de thèse sur la typologie de structure et le modèle de structure consiste à élaborer un ensemble de règles sur la structure en taille, le mélange et la structure spatiale, qui permettent le passage de données agrégées d'un peuplement réel (par ex. surface terrière, nombre de tiges par essence et type spatial) à un peuplement virtuel qui lui est proche. Ce peuplement virtuel pourra ensuite servir d'état initial dans le cadre d'une simulation informatique d'évolution du peuplement. L'objectif du deuxième projet est de déterminer l'échelle de modélisation la plus pertinente pour simuler la croissance des peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre. La question de

l'échelle est importante mais se révèle délicate à traiter (voir encadré), sachant que l'objectif est de fournir au gestionnaire un outil simple, offrant un bon support pour l'élaboration d'un guide de sylviculture ou pour la prédiction de production. La calibration des modèles est effectuée à partir de l'analyse de carottes de sondage prélevées sur des arbres choisis en fonction de leur stade de développement et leur situation de compétition.

Quelques résultats sur les mélanges chêne sessile – pin sylvestre

Les données de croissance obtenues par sondage ont servi à construire un premier modèle "arbre dépendant des distances" (voir encadré). Ce modèle a permis de préciser les interactions intra et interspécifiques dans ce mélange. Ainsi, les premiers résultats montrent que les pins entourés de pins ont eu une croissance plus faible que les pins entourés de chênes. La figure 6 donne un exemple de résultat obtenu sur un dispositif d'un hectare. On peut notamment remarquer que, pour une même circonférence, le chêne et le pin ont pratiquement les mêmes accroissements en surface terrière.

Le modèle de croissance a été intégré dans la plateforme ou logiciel CAPSIS et des simulations sont désormais envisageables. Par exemple, il est possible d'estimer pour les 10 ans à venir la production totale en surface terrière des dispositifs étudiés et de répartir cette production entre le chêne et le pin. Il est également possible dans certains cas d'estimer le temps au bout duquel le pin aura atteint un diamètre exploitable. Cependant, le domaine d'utilisation de cet outil est encore limité en particulier parce qu'il a été construit dans une gamme de fertilité restreinte. Des données récoltées en 2007 dans 5 nouveaux dispositifs devraient permettre de mieux prendre en compte ce facteur.

Pourquoi des modèles ?

Selon Coquillard et Hill (1997), un modèle est tout simplement « une abstraction qui simplifie le système réel étudié ». Les modèles présentent l'avantage de rassembler les connaissances réunies autour d'un système (ex. un peuplement) en une structure organisée, raisonnée, simplifiée. Cette structuration est nécessaire pour appréhender les systèmes complexes (le cas de la forêt) où les objets et leurs interactions sont multiples, les dynamiques

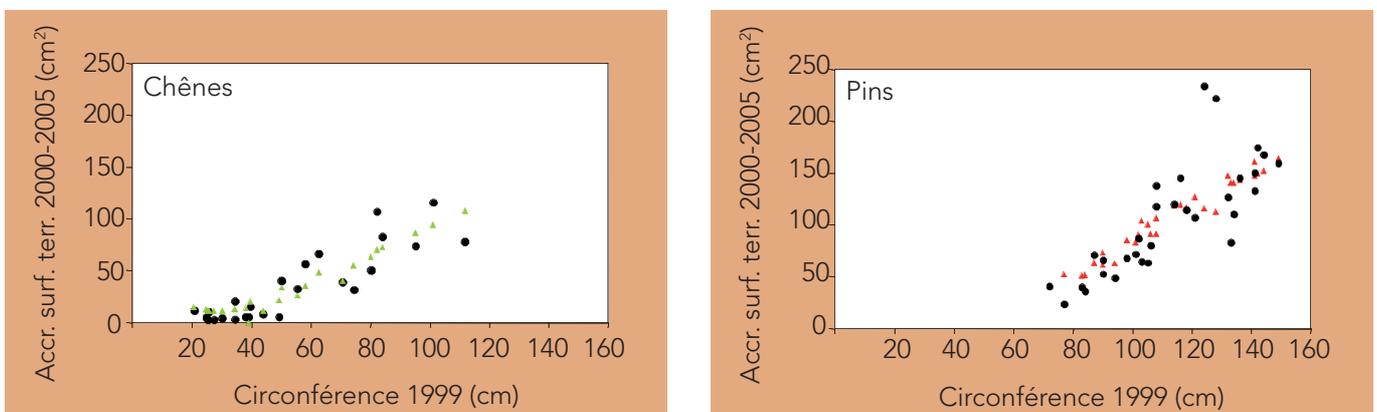
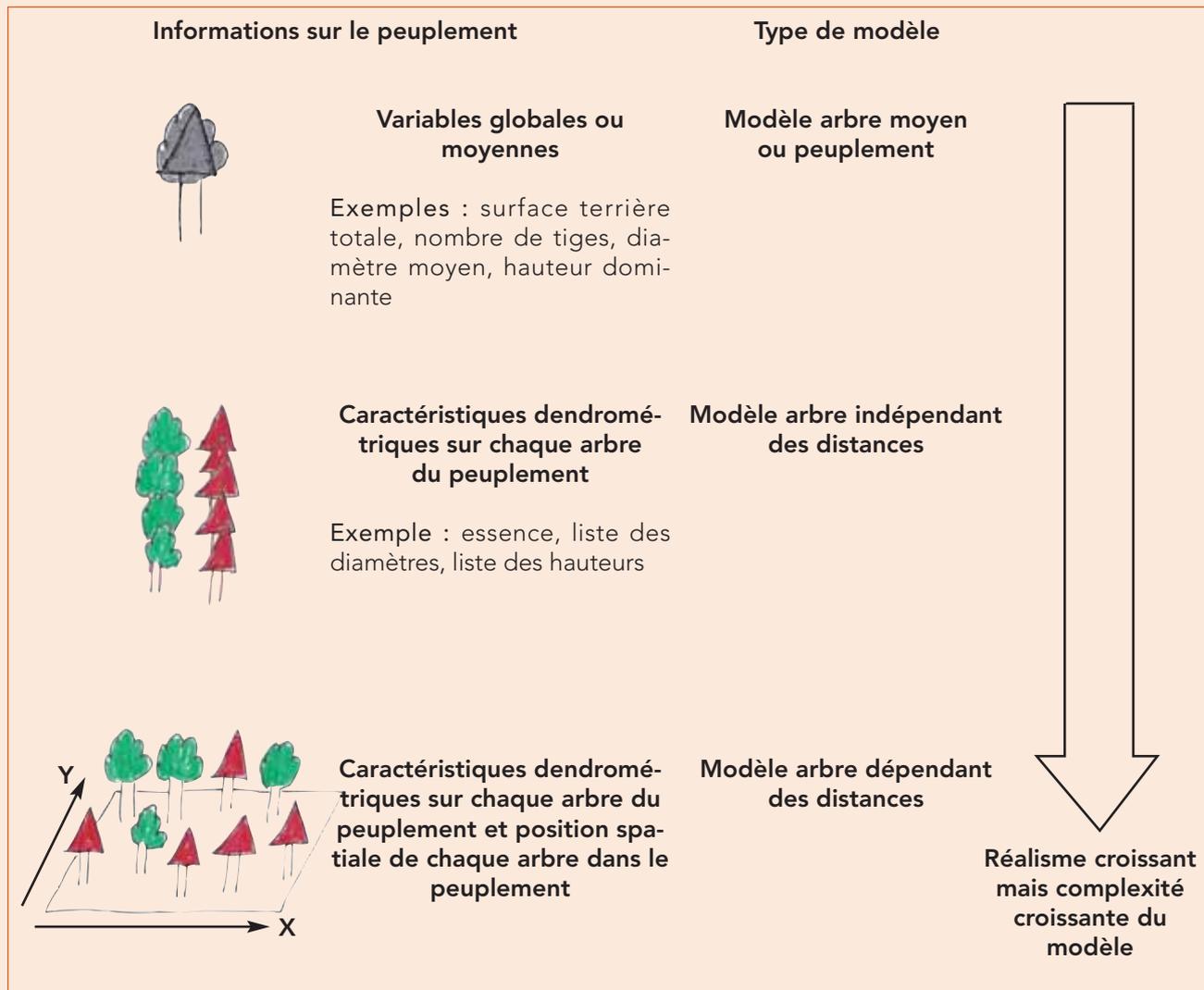


Fig. 6 : données observées et données prédites par le modèle « arbre dépendant des distances » sur un dispositif. Les points noirs sont les données observées et les points en couleur sont les données prédites

Niveaux de détail des modèles de croissance forestiers



Présentation de trois grands types de modèles forestiers d'après Houllier et al. (1991) ayant des niveaux de détail différents

Comme le montre la figure, les modèles de croissance forestiers peuvent être plus ou moins détaillés. Chaque type de modèle offre des avantages et des inconvénients. Par exemple, les modèles de type « peuplement » utilisent des données facilement accessibles aux gestionnaires pour prédire la croissance et la production mais ne permettent pas de tester des sylvicultures d'arbre. Les modèles de type « arbre dépendant des distances », quant à eux, permettent de prendre en compte de façon fine les interactions intra et interspécifiques mais utilisent des informations sur le peuplement très contraignantes pour une utilisation dans un cadre de gestion. Le choix du niveau de détail d'un modèle dont l'objectif est l'aide à la gestion résulte donc d'un compromis entre sa possibilité d'utilisation par le gestionnaire et sa capacité à rendre compte des phénomènes de croissance et de dynamique de façon réaliste.

Dans l'objectif de rechercher ce compromis, l'équipe du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson a commencé la construction d'une série de modèles simplifiés ayant différents niveaux de détail. Ces modèles seront comparés à la fois sur des critères de précision des prédictions et sur des critères d'utilisation des modèles qui seront définis en collaboration avec les gestionnaires.

lentes, rendant l'expérimentation parfois délicate. Les modèles permettent de mettre en évidence des propriétés émergentes - le tout n'est pas la somme des parties -, de révéler des carences dans nos connaissances et de proposer de nouvelles hypothèses. Ils sont donc particulièrement utiles dans le domaine scientifique. Dans le domaine de la gestion forestière, les modèles de croissance sont intégrés dans des simulateurs de croissance réunis pour la plupart au sein de la plateforme logicielle CAPSIS (de Coligny *et al.* 2003). Dans le cas de peuplements réguliers monospécifiques, ils permettent de tester l'effet d'interventions sylvicoles sur la production, la qualité et la croissance des peuplements (Goreaud *et al.* 2005). Un certain nombre d'entre eux permettent de simuler la dynamique de peuplements mélangés (SimCAP, SAMSARA, VENTOUX). Les modèles permettent également de réaliser des expérimentations virtuelles (ex. application de détournages dans des simulations) pour peu que les interventions simulées soient cohérentes avec les domaines de validité des modèles construits.

Conclusions

À partir de trois études différentes menées en forêts mélangées et/ou irrégulières, nous venons d'illustrer trois approches différentes. Ces approches, qui ne sont pas forcément spécifiques aux forêts hétérogènes, sont complémentaires, les unes favorisant la mise en évidence de relations causales, la mise en évidence de différences ou de relations spécifiques entre objets, d'autres permettant de réaliser une synthèse des connaissances pour dégager des propriétés et réaliser des expérimentations virtuelles. Pour être pleinement effi-

cace, la modélisation, qui se révèle particulièrement intéressante pour appréhender la complexité des forêts hétérogènes, doit s'adosser aux approches expérimentales et descriptives. Notre capacité à élaborer des interventions pertinentes pour la gestion des mélanges ou la gestion des futaies irrégulières dépendra en grande partie de notre volonté de mettre en place un réseau cohérent d'essais et d'études en vue de la construction de futures générations de modèles de croissance et de dynamique de forêts hétérogènes.

Thomas CORDONNIER

ONF, DTech-Recherche

Christian GINISTY

Cemagref, UR Écosystèmes forestiers
Nogent-sur-Vernisson

François NINGRE

LERFoB, Équipe Croissance —
Production
INRA Champenoux

Thomas PÉROT

Cemagref, UR Écosystèmes forestiers
Nogent-sur-Vernisson

Alexandre PIBOULE

ONF, DT Lorraine
Service patrimonial

Isabelle VINKLER

LERFoB, Équipe Croissance —
Production
INRA Champenoux

Bibliographie

COQUILLARD P., HILL D.R.C., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Paris : Masson. 273 p.

PETERS R., 1997. Beech forests. Coll. « Geobotany », n° 24. Londres : Kluwer Academic Publishers. 169 p.

HEGYI F., 1974. A simulation model for managing Jack-pine stands. In Growth Models for Tree and Stand Simulation (J. Fries, ed.) Stockholm : Royal College of Forestry, Research note, n° 30, pp. 74-90

HOULLIER F., BOUCHON J., BIROT Y., 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. Revue Forestière Française, vol. 43, n° 2, pp. 91-102

DE COLIGNY F., ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C., SAINT-ANDRÉ L., 2003. CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture : advantages of a shared forest-modelling platform. In Modelling forest systems (Amaro A., Reed D. and Soares P., eds). Wallingford : CABI Publishing, pp. 319-323. Relativity, models and parameters estimation — the forestry scenario, 2-5/06/2002, Sesimbra, Portugal.

GOREAUD F., DE COLIGNY F., COURBAUD B., DHOTE J.F., DREYFUS P., PÉROT T., 2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. Vertigo, vol. 6, n° 2, 12 p.

La sylviculture des chênaies continentales en futaie irrégulière

Le guide des sylvicultures des chênaies continentales devrait paraître début 2008. Ce guide propose de nombreux itinéraires sylvicoles, selon les divers traitements possibles en forêt métropolitaine, ceci pour répondre à la grande variabilité des contextes (écologiques, climatiques, sociaux...) de sa zone d'application (le grand quart nord-est de la France et une part du nord ouest). Cet article résume les préconisations sylvicoles proposées pour celles de ces chênaies qu'on décidera de conduire en futaie irrégulière.

Il rappelle les principes généraux de la futaie irrégulière pour les adapter au cas assez nouveau des chênaies et les décline en préconisations sylvicoles pour le martelage comme pour les travaux. L'article se conclut enfin sur l'application du principe de désignation des arbres d'avenir, pratique utile pour mettre en œuvre une sylviculture somme toute assez novatrice.

Les principes généraux de la futaie irrégulière... adaptés aux chênaies

Le traitement en futaie irrégulière relève d'une approche profondément différente du traitement en futaie régulière (ou par parquets, les deux ayant comme point commun de pouvoir suivre le renouvellement par surface). Il se caractérise par deux principes fondamentaux : 1) mettre le peuplement dans des conditions qui permettent un renouvellement diffus et 2) pratiquer une sylviculture où chaque arbre au sein d'un même peuplement peut être enlevé ou conservé au titre de l'amélioration ou de la régénération.



Sardin, ONF

Le premier principe conduit à la présence d'un couvert permanent et continu à l'échelle du peuplement élémentaire. Le renouvellement est diffus, c'est-à-dire qu'il s'acquiert sur de petites unités de surface, en général inférieures à 50 ares, avec pour conséquence la présence possible de l'ensemble des processus, de la régénération jusqu'à l'obtention d'arbres récoltables, sur de petites zones (bien inférieures à la parcelle). Aussi, les actions sylvicoles liées à la régénération et à l'amélioration sont intimement mêlées et ne peuvent pas être planifiées distinctement, ni dans le temps ni dans l'espace, ce qui exclut le suivi surfacique du renouvellement.

En chênaie, les conséquences de ce premier grand principe ne sont toutefois pas aussi claires que pour les formations forestières plus couramment traitées en irrégulier, comme les sapinières. En effet, compte tenu de la longévité des chênes et de la grande difficulté pour leurs semis à survivre à l'ombre, la présence de l'ensemble des processus sur la plus petite surface possible est très difficile à

assurer en permanence. Cela exigerait le maintien du peuplement à une surface terrière très faible (avec des individus de toutes les classes de diamètre mais chacun en nombre très limité), incompatible avec la maîtrise de la végétation accompagnatrice qui, se développant rapidement, nuirait au renouvellement. Ce très faible capital sur pied nuirait également au bilan économique. Aussi, en pratique, il se trouvera toujours des périodes durant lesquelles il n'y aurait aucun besoin de renouvellement sur un parquet voire sur l'ensemble d'une parcelle, sans pour autant que le principe de gestion durable (maintien dans le temps de l'atteinte des objectifs) soit remis en cause.

Cette recherche de renouvellement diffus ne veut donc pas dire qu'il doit être continu, ce qui supposerait une présence permanente de semis dans toutes les parcelles.

Le second principe se traduit par des consignes sylvicoles qui incitent le sylviculteur à déterminer son choix à l'échelle de l'arbre et de son entourage immédiat. Le sylviculteur examine individuellement chaque arbre et prend la décision de le conserver ou de l'enlever après avoir apprécié ses différentes fonctions (production de bois de valeur, semencier, arbre de grand intérêt pour la biodiversité...) en lien avec ses voisins.

En chênaie, compte tenu du caractère héliophile des chênes, la structure des peuplements s'organise souvent en bouquets, notamment sur sol acide. Ceux-ci ne sont pas matérialisés sur le terrain, pour une question de coût, aussi le sylviculteur doit s'adapter à l'organi-

sation des arbres par un martelage *ad hoc*. Les consignes de martelage sont les mêmes ; leur application diffère simplement selon que la structure est irrégulière par pieds d'arbres ou par bouquets. Dans le second cas les arbres d'un groupe font l'objet d'une même analyse et donc d'une même nature d'intervention. Le marteleur ne contraint pas la structure mais s'y adapte en recherchant toujours à travailler pour les arbres de qualité et dans le cadre d'un niveau de prélèvement souhaité.

En effet, outre l'approche individuelle des arbres lors du martelage, le niveau de prélèvement est guidé par l'accroissement courant du peuplement et le capital sur pied souhaité, ce dernier pour assurer le premier principe, un renouvellement diffus, et conserver un niveau de production optimum.

La sylviculture en futaie irrégulière combine ainsi des préconisations à l'échelle du peuplement par l'intermédiaire de garde-fous techniques (surface terrière et accroissement) et des préconisations à l'échelle de l'arbre pour le choix des tiges à enlever.

En chênaie, cette combinaison de consignes aux deux échelles, peuplement et arbre, s'applique pleinement.

La surface terrière, un garde-fou technique pour le suivi

Les connaissances actuelles ont permis de fixer le niveau de surface terrière favorable à l'installation de la régénération dans les chênaies en contexte acide et/ou hydromorphe (Brucciamachie et al., 2005) : il se situe entre 12 et 15 m²/ha de tiges précomptables (diamètre à 1,30 m supérieur ou égal à 17,5 cm), auxquels il faut rajouter 2-3 m²/ha de taillis et 1-2 m²/ha de perches. C'est probablement le niveau de surface terrière du taillis et des perches qui est le

Quelles chênaies traiter en futaie irrégulière ?

Le choix du traitement dépend de plusieurs facteurs : objectif du peuplement, structure des peuplements, structure de la propriété, station... Si ce n'est pas l'objet de l'article, il est important de savoir que, **techniquement**, le traitement en futaie irrégulière peut être d'un grand intérêt dans certains contextes stationnels et, à l'inverse, difficile à mettre en œuvre, sauf à des coûts prohibitifs, dans d'autres.

Dans les contextes stationnels à engorgement contraignant (forte hydromorphie, souvent associée à des sols acidiphiles) la futaie irrégulière est un traitement approprié pour éviter la conduite de la phase de régénération sur de larges surfaces. En effet, dans ces conditions les risques de remontée de nappe et d'envahissement par les graminées sont forts, conduisant à des coûts de renouvellement des peuplements élevés, voire à des échecs fréquents. La futaie irrégulière est également intéressante dans les chênaies très sèches où l'objectif de production est secondaire, là aussi pour éviter des phases de régénérations coûteuses.

Inversement, dans les hêtraies – chênaies où le hêtre est l'essence climacique, traiter des chênaies en futaie irrégulière conduirait à terme à **une perte de prédominance du chêne au profit du hêtre**. En effet, dans ces contextes, l'évolution naturelle d'un peuplement mélangé de chêne et hêtre conduit rapidement à la hêtraie quasi pure. Les petites trouées, par lesquelles s'opère le renouvellement en futaie irrégulière, sont régénérées principalement par le hêtre, du fait de sa dynamique et de son tempérament sciophile. Pour que le chêne s'installe, il faut une perturbation beaucoup plus forte et l'ouverture d'une grande trouée (celle-ci pouvant alors être colonisée d'abord par les espèces pionnières ou post-pionnières : chêne pédonculé, bouleau...).

En futaie irrégulière où l'on recherche le maintien d'un couvert continu, le hêtre est donc largement favorisé au détriment du chêne. Si, en intensifiant les travaux en phase juvénile, on peut orienter le mélange vers plus de chêne que ne le ferait une évolution naturelle, il apparaît illusoire, dans ces conditions stationnelles, de conduire une sylviculture où la majorité du volume récolté serait du chêne (plus des 2/3).

Le propriétaire qui aura choisi de traiter en irrégulier sa hêtraie – chênaie doit être conscient que le chêne ne pourra alors être qu'une essence secondaire. Cette orientation est risquée dans le cadre des changements climatiques en cours : le chêne sessile sera mieux adapté que le hêtre dans ces habitats. De plus, si l'objectif principal des peuplements est la production de bois, le bilan financier sera bien moins favorable sur le long terme, la valeur du bois de chêne ayant presque toujours été supérieure au cours du temps à celle du hêtre.

plus délicat à maîtriser, car il influence très fortement le climat lumineux. Par exemple, 2 m²/ha représentent 250 tiges/ha de diamètre 10 cm : à elles seules, elles peuvent avoir un pouvoir couvrant important si leurs houppiers sont bien développés et s'il s'agit d'espèces « ombrageantes » comme le hêtre, le tilleul, le charme...

La surface terrière d'équilibre est donnée avec une fourchette pour intégrer la variabilité des peuplements ainsi que la réalisation des coupes, le bas de la fourchette donnant la valeur après coupe, le haut avant coupe.

Pour le suivi à l'échelle de la forêt, la surface terrière moyenne est

souvent tirée d'une campagne de mesures réalisée à l'occasion de la révision de l'aménagement. Le résultat intègre donc tous les cas de figure possibles vis-à-vis du passage en coupe. La surface terrière d'équilibre à l'échelle de la forêt est donc le centre de la fourchette, c'est-à-dire 13-14 m²/ha de tiges précomptables plus 3-4 m²/ha de taillis et perches (diamètre compris entre 7,5 et 17,5 cm).

Mais dans les forêts traitées en conversion en futaie irrégulière, l'équilibre est souvent loin d'être atteint. La répartition des catégories de grosseur de bois à l'échelle de la forêt peut être nettement déséquilibrée au profit d'une ou deux catégories. La surface terrière moyenne souhaitable à un instant donné sur la forêt, appelée surface terrière objectif instantanée, dépend alors de la nature de ce déséquilibre, c'est-à-dire des types de peuplements en présence.

Ainsi, une forêt où les bois moyens et gros bois non encore matures seraient surabondants peut supporter un capital sur pied supérieur. Vouloir le réduire trop rapidement à la valeur objectif d'une forêt équilibrée — 13-14 m²/ha — conduirait inévitablement à de nombreux sacrifices d'exploitabilité. À l'inverse, pour une forêt en cours de rajeunissement, c'est-à-dire avec de gros bois arrivés à maturité et déjà de nombreux très jeunes peuplements, la surface terrière objectif instantanée sera potentiellement inférieure à 13 m²/ha. La maintenir au-dessus

coûte que coûte pourrait aussi conduire à des sacrifices en retardant trop la récolte des bois mûrs.

A priori, il conviendrait de moduler la fourchette de surface terrière selon qu'on a affaire au chêne sessile ou au chêne pédonculé. En effet, le chêne pédonculé est plus exigeant en lumière que le chêne sessile. Malheureusement nos connaissances actuelles ne nous permettent pas de faire cette distinction. On peut toutefois affirmer que le traitement en futaie irrégulière est plus adapté au chêne sessile qu'au chêne pédonculé.

Les coupes

Le martelage est l'opération la plus importante de toute la gestion forestière. Il intervient en même temps que ou après l'installation de cloisonnements d'exploitation, outil indispensable à la bonne conduite des opérations et à la protection des sols et des peuplements.

En amont des consignes de martelage, les deux critères majeurs suivants doivent être respectés :

- **la surface terrière objectif** d'équilibre après éclaircie, soit 12 m²/ha pour l'étage principal, plus 2 m² de taillis et 1 m² de perches ;
- **le prélèvement** de 3 m²/ha au minimum (minimum qui permet la commercialisation dans de bonnes conditions) et au maximum de 5 m²/ha (pour éviter les stress et les dégâts au peuplement restant).

La rotation des coupes est alors adaptée à la productivité de la station (voir tableau). On peut estimer que celle-ci varie de 0,3 à 0,7 m²/ha/an pour un peuplement clair et irrégulier. La rotation des coupes qui permet un prélèvement de 3-4 m²/ha, voire 5 m²/ha, peut donc aller de 6 à 12 ans. Des fourchettes de rotation sont données dans le tableau suivant en fonction de trois niveaux de fertilité.

Dans ce cadre, les consignes de martelage peuvent être décomposées selon les deux strates que sont l'étage principal et l'étage bas (incluant le sous-étage, le taillis et les perches).

Les consignes de martelage pour l'étage principal

Dans l'étage principal, le martelage doit répondre à quatre principes prioritaires : le principe de récolte, le principe d'amélioration, le principe de renouvellement et le principe sanitaire.

Le principe de récolte

Les arbres de l'étage dominant ayant atteint leur diamètre d'exploitabilité peuvent être prélevés ; ce diamètre est fonction de la qualité. Sauf s'il est conservé comme arbre « bio » ou pour une autre raison, un chêne médiocre de qualité D peut être prélevé au titre de la récolte dès que son diamètre a atteint 55 cm. Ce prélèvement n'est réalisé que si le peuplement alentour le permet : si cet arbre (médiocre) n'en gêne aucun autre et si le prélèvement d'arbres prioritaires atteint déjà localement 5 m²/ha, il pourra être conservé pendant une nouvelle rotation.

De même, un chêne de qualité A ou B peut être récolté dès que son diamètre atteint 75 cm. Il peut toutefois être conservé, au maximum jusqu'à un diamètre de 90 cm, s'il ne présente aucun risque d'altération et si le propriétaire le souhaite (pas de besoin financier particulier).

	Fertilité très bonne	Fertilité bonne	Fertilité faible
Surface terrière des pré-comptables objectif après coupe	12 m ² /ha	12 m ² /ha	12 m ² /ha
Production moyenne attendue	≥ 0,6 m ² /ha	0,4-0,5 m ² /ha	≤ 0,35 m ² /ha
Rotation préconisée	6 - 9 ans	8 - 12 ans	10 - 15 ans

Tab. 1 : rotation des coupes en fonction des niveaux de fertilité et de l'accroissement en surface terrière



T. Sardiri, ONF

Un tel maintien de très gros arbres mûrs augmente toutefois les risques de perte de revenu par une plus longue exposition aux aléas.

Si ce principe de récolte peut conduire à la création d'une trouée, par l'enlèvement de plusieurs gros arbres adjacents, le sylviculteur aura dû anticiper en jouant sur le climat lumineux local lors du précédent passage pour que la régénération soit installée. Le plus souvent, l'apport de lumière aura été obtenu grâce à l'intervention sur le taillis ou le sous-étage et à l'éclaircie du peuplement du côté sud – sud-ouest de la future trouée, d'où provient le plus de lumière.

Les essais en place ont en effet montré que la taille de la trouée avait beaucoup moins d'influence que le dosage de la lumière par l'intermédiaire du taillis, ceci avec des trouées de 6 ares ou moins.

Le principe d'amélioration

Parmi les arbres n'ayant pas atteint leur diamètre d'exploitabilité, ceux qui gênent le développement du houppier (et donc la croissance) des plus belles tiges sont enlevés. Durant la première moitié de vie de l'arbre, l'amélioration permet aux tiges d'avenir de développer un houppier équilibré. Le marte-

leur peut alors être amené à faire le choix entre tiges de qualité et diamètre équivalents qui se gênent, et ceci d'autant plus que l'arbre est jeune.

Durant la phase de maturation, seconde moitié de vie de l'arbre, le houppier ne croît plus de manière soutenue en diamètre ; le martelage privilégie la conservation des arbres de qualité même si ceux-ci peuvent être parfois assez proches. C'est le maintien du peuplement avec un capital sur pied adapté (entre 12 et 15 m²/ha de l'étage principal) qui permet alors d'assurer une croissance optimale des beaux arbres.

On n'enlève pas un arbre médiocre voire « moche » au seul prétexte qu'il est « moche ».

Le principe de renouvellement

Le principe de renouvellement consiste à prélever les tiges qui empêchent l'installation ou le développement de la régénération comme celles des perches. Ce principe ne doit pas conduire à enlever une tige de qualité qui n'aurait pas atteint son diamètre d'exploitabilité. **Une tige de bonne qualité prélevée au titre du principe de renouvellement doit l'être simultanément au**

titre du principe de la récolte

(c'est-à-dire qu'elle doit avoir atteint son diamètre d'exploitabilité). Pour les autres, il peut s'agir de tiges du sous-étage ou du taillis (cf. plus loin les recommandations pour intervenir dans cette strate).

La régénération et les perches favorisées par les prélèvements réalisés selon ce principe sont "utiles" au peuplement, c'est-à-dire qu'elles participent ou vont prochainement participer au renouvellement du peuplement car les arbres d'avenir qui les dominaient ou les dominent ont été ou vont être enlevés dans un avenir proche (diamètre d'exploitabilité atteint ou proche de l'être).

Le principe sanitaire

Les arbres porteurs de maladies pouvant être transmises aux arbres sains sont enlevés. Cela peut être le cas avec les feuillus en mélange dans la chênaie (chancre du hêtre ou du frêne...) mais très rarement avec le chêne. Selon le même principe, les chênes de qualité ayant une blessure (charpentière cassée, blessure de débardage...) qui risque de leur faire perdre de la valeur sont également récoltés.

... et les autres critères

Outre la mise en œuvre de ces quatre principes prioritaires, d'autres raisons possibles justifiant l'enlèvement d'un arbre de l'étage dominant peuvent se présenter :

- pour faciliter l'exploitation : un arbre peut être marqué en abandon pour faciliter l'abattage d'un voisin ou pour en faciliter le débardage ;
- au titre de la biodiversité : un arbre peut être marqué en faveur d'un autre arbre porteur d'un phénomène participant à la biodiversité (arbre d'espèce rare, trouée avec espèce herbacée rare, mare, tourbière...);
- au titre de l'accueil du public et du paysage : un arbre peut être marqué pour dégager une belle vue, un arbre remarquable... ;

■ pour prévenir un risque : les arbres qui peuvent, par leur chute naturelle, présenter des risques doivent être enlevés (arbre en déséquilibre au-dessus d'une route, d'un chemin, d'un torrent...).

Les consignes d'intervention dans le sous-étage, le taillis et les perches

Le martelage dans l'étage bas est une opération très délicate en futaie irrégulière ; d'une façon générale, il est toujours orienté au profit de tiges d'avenir ou de la régénération de l'essence objectif.

Interventions au profit des tiges d'avenir

Les brins qui entrent en concurrence avec des tiges d'élite sont éliminés (concurrence au niveau des houppiers, soit en empêchant leur houppier de se développer, soit en risquant de faire mourir de grosses branches), ceci au profit des perches et petits bois d'avenir comme au profit des bois de qualité en phase de maturation ; *a contrario*, les brins qui protègent une tige d'avenir sont conservés.

Interventions au profit de la régénération

Les brins qui entrent en concurrence avec le houppier des semenciers sont éliminés (afin de favoriser la fructification).

Les brins sans avenir qui surmontent ou sont en bordure sud – sud-ouest de semis utiles (d'où parvient la lumière) sont éliminés. Par « semis utiles », on entend les semis qui participent ou vont très certainement participer au renouvellement du peuplement car les arbres qui les dominaient ou les dominant ont été ou vont être enlevés dans un avenir proche (diamètre d'exploitabilité atteint ou proche de l'être).

Dosage du climat lumineux

Les cépées de taillis sont éclaircies si nécessaire pour améliorer le climat lumineux global (enlèvement

du ou des plus gros brins) ; la surface terrière optimale du taillis après coupe est de l'ordre de 2 m²/ha pour faciliter l'apparition de semis. Dans les bouquets où les semis ont vocation à participer au renouvellement du peuplement, le taillis est progressivement prélevé à moyen terme (à raisonner avec l'enlèvement du (ou des) semencier(s), intervention très localisée dans l'espace).

Le cas particulier des premières de conversion de taillis-sous-futaie

Dans le cas du traitement de conversion de taillis-sous-futaie en futaie irrégulière, la première coupe de conversion comprend souvent une intervention spécifique dans le taillis. En effet, celui-ci peut être abondant et il faut le ramener à 2 ou 3 m²/ha. Dans les types de peuplements à gros bois prédominants, le taillis peut même être totalement éliminé localement pour favoriser la régénération, à condition qu'il puisse se réinstaller aisément, ce qui n'est pas le cas dans les chênaies acidiphiles hydromorphes où le taillis est le plus souvent clairsemé.

Les travaux

De manière générale, le traitement en irrégulier doit conduire à une régénération diffuse. Les travaux d'entretien sont donc susceptibles de concerner une majorité des parcelles de la forêt et il n'y a donc pas de période privilégiée liée à une phase du cycle sylvicole. Dans la plupart des cas, on préconise de faire les travaux peu après l'exploitation d'une coupe et d'y repasser éventuellement à mi-rotation.

Ce principe d'un passage systématique peu de temps après coupe (dans l'année qui suit par exemple) a été retenu pour les chênaies continentales traitées en irrégulier. Toutefois, ce rythme doit être adapté à l'apparition des glandées. En effet, contrairement aux

hêtraies, sapinières ou même chênaies atlantiques, les fructifications des chênaies du grand quart Nord-Est sont plutôt irrégulières. Le sylviculteur devra profiter des bonnes années pour favoriser l'installation de la régénération.

Les travaux peuvent se décomposer selon trois grands types : la mise en lumière de la régénération, les compléments éventuels en régénération artificielle, et les travaux en phase de qualification des perches.

La mise en lumière de la régénération

Les travaux dont il est question ici ne doivent en aucun cas concerner systématiquement l'ensemble des semis qui se seraient installés dans un climat lumineux favorable. Seuls sont à favoriser ceux qui ont une forte probabilité de participer dans un avenir proche au renouvellement du peuplement : on parle de **semis utiles**. Ce sont les semis installés au pied de tiges qui pourront être enlevés dans un avenir proche (tige de qualité au diamètre d'exploitabilité, tige sans avenir pouvant être enlevée au titre du principe de renouvellement...).

La mise en lumière de la régénération consiste également en actions visant à favoriser l'installation de semis là où ils seraient utiles. C'est le cas sous les arbres « mûrs » qui seront très certainement récoltés à la prochaine coupe : la présence de souille peut y empêcher l'installation de semis.

En résumé, l'intervention au profit de la régénération basse (de hauteur inférieure à 3 m) peut comprendre, si besoin est, les opérations suivantes :

- nettoyage visant à favoriser l'installation des semis (sous les semenciers à récolter à la prochaine coupe) ;
- dégagement des semis existants vis-à-vis d'une végétation accom-



T. Sardin, ONF

pagnatrice trop vigoureuse (cas de la ronce notamment) ;

- élimination de la végétation faisant ombrage aux semis (au-dessus ou du côté sud sud-ouest) ;
- dosage du mélange d'essences.

Par ailleurs, le complément artificiel des régénérations naturelles doit rester exceptionnel : en futaie irrégulière il est nécessairement diffus ou en bouquets, ce qui rend le suivi délicat et coûteux.

Les travaux en phase de qualification des perches

En phase de qualification des perches, entre 3 et 13-15 m de hauteur, les passages sont légers et ont pour but d'éliminer les tiges vigoureuses de mauvaise qualité qui dominent, concurrencent ou blessent des individus de qualité (tiges d'avenir), ainsi que de doser le mélange.

Sur station acidiphile ou hydro-morphe, conditions les plus probables de traitement en irrégulier pour les chênes, la régénération est le plus souvent pure et en bouquets denses. Dans ces cônes de régénération, l'intervention revient à réaliser un dépressage localisé au profit des tiges d'avenir.

Parfois, des soins culturaux pourront être réalisés au profit des

tiges d'avenir adultes. Il s'agit alors d'éliminer des brins (trop petits ou trop peu nombreux pour partir en coupe) qui viendraient les concurrencer, soit en empêchant le développement de leur houppier, soit en risquant de faire mourir des grosses branches.

Tous ces travaux d'entretien peuvent être réalisés par coupe (recépage rez-terre ou à hauteur), casage ou annélation. Le passage peut être aussi l'occasion de réaliser des opérations ciblées d'élagage sur quelques tiges d'avenir. Cela est souvent indispensable avec le merisier dont les branches mortes ont beaucoup de difficulté à tomber naturellement.

Adaptations pour la conversion

Les préconisations pour la futaie irrégulière s'appliquent sans restriction à la conversion en futaie irrégulière. Toutefois une structure de départ très éloignée de l'équilibre imaginé à long terme peut conduire à une répartition plus inégale des travaux. Si le principe du passage après coupe reste valable, il ne peut être systématique. En effet, il peut se trouver des parcelles où aucun renouvellement n'est souhaité et qui seront donc dispensées de travaux et d'autres parcelles où la régénération n'est pas recherchée mais qui

nécessitent toutefois un passage au profit des perches et petits bois d'avenir. À l'opposé, il peut se trouver des parcelles où la régénération et le renouvellement sont majoritaires et imposent un second passage à mi-rotation.

Pour faciliter la gestion et le suivi, la désignation des arbres d'avenir

La sylviculture des chênaies en futaie irrégulière est une pratique peu répandue pour laquelle nous avons peu de recul. La désignation des arbres d'avenir, arbres au profit desquels le sylviculteur doit travailler sur le long terme, peut s'avérer être un outil d'aide intéressant dans ce contexte d'évolution sylvicole forte où le renouvellement des peuplements est étalé dans le temps et non plus réalisé sur une courte période.

En effet, lors des martelages, le sylviculteur repère intellectuellement des arbres d'avenir pour travailler à leur profit. Cela demande de l'expérience et prend du temps, d'une part parce qu'avec le chêne de production cela nécessite un examen approfondi afin de détecter la présence éventuelle de défauts souvent discrets (formations épicromiques notamment). D'autre part, parce que ce traitement mélange intimement les opérations d'amélioration et de régénération.

Quand désigner ?

Les arbres d'avenir en futaie irrégulière sont aussi bien des petits bois que des perches ou des bois moyens (classes de diamètre allant de 10 à 45 cm). Ces catégories étant mélangées au sein d'une unité de gestion, il n'existe pas de moment dans l'évolution des peuplements qui soit à privilégier pour la désignation.

La question se pose toutefois de savoir si cette désignation doit être réalisée préalablement au



T. Sardin, ONF

essences, caractéristique souhaitée dans beaucoup de peuplements.

Conclusion

La sylviculture des feuillus en futaie irrégulière, surtout en chênaie, paraît plus complexe qu'en futaie régulière ; elle est surtout moins bien connue parce que beaucoup moins largement pratiquée et étudiée. Cette apparente difficulté ne doit pas être exagérée au point de devenir un obstacle au choix du traitement irrégulier, notamment dans les chênaies hydromorphes où il est bien adapté. Grâce aux interventions périodiques et aux contrôles *a posteriori* qui peuvent être faits, le suivi est un acte fondamental faisant partie intégrante de la gestion, une éventuelle petite erreur peut être corrigée à l'intervention suivante.

Thierry SARDIN

ONF, direction technique
département forêts

Bibliographie

La substance de cet article est tirée du guide ONF des sylvicultures des chênaies continentales, à paraître début 2008.

DE TURCKHEIM B., BRUCIAMACCHIE M., 2005. La futaie irrégulière : théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Aix-en-Provence : Edisud. 286 p.

BRUCIAMACCHIE M., TOMASINI J., SUSSE R., 2005. Gestion des peuplements irréguliers : réseau AFI : synthèse 1991-2005. Besançon : Association futaie irrégulière. 103 p.

martelage ou simultanément (cette dernière solution se pratique déjà à l'ONF ainsi que dans certaines forêts privées). Pour un peuplement donné, on peut distinguer la première désignation des suivantes :

la première désignation peut s'envisager indépendamment du martelage. Pratiquée en équipe, elle suscite les discussions et les échanges, importants dans la phase de mise en place d'une nouvelle sylviculture ;

les désignations suivantes sont toujours réalisées en même temps que le martelage. Elles consistent le plus souvent à compléter la première en désignant de nouvelles perches voire quelques petits bois.

La vigueur prime, la qualité se juge sur la bille de pied

Pour la fonction de production, les tiges à désigner sont d'abord des arbres vigoureux, ce qui se traduit par un rapport hauteur/diamètre satisfaisant (plutôt inférieur à 70) et un houppier bien développé. Ensuite, ce sont des tiges dont la bille de pied est de qualité ou susceptible de le devenir.

Le nombre s'adapte à la qualité du peuplement

Nos connaissances ne nous permettent pas de savoir aujourd'hui quelle serait la densité optimale d'arbres d'avenir dans une chênaie traitée en irrégulier. En désignant des tiges allant des perches aux bois moyens (classes de diamètre 10 à 45), il est probable qu'un peuplement de bonne qualité puisse permettre de désigner au moins 100 tiges/ha, ne serait-ce que parce qu'il devrait déjà comporter 30 à 50 bois moyens (tiges de diamètre compris entre 30 et 45 cm et qui seront récoltées au diamètre d'exploitabilité entre 50 et 100 ans plus tard), bois moyens auxquels doivent être rajoutés les petits bois et les perches (désignés en nombre comprenant une marge de sécurité pour intégrer les potentielles dégradations de qualité).

Du chêne surtout, mais pas seulement

Pour un peuplement à objectif prioritaire de production de chêne, les arbres d'avenir sont au moins aux deux tiers des tiges de chêne. La désignation reste l'opération qui facilite le mélange des

L'expérience jurassienne en futaie jardinée résineuse et mixte

Un dossier sur la gestion des futaies hétérogènes ne saurait se dispenser d'évoquer la futaie jardinée emblématique du Jura. Bien sûr beaucoup a été écrit, mais il n'est jamais inutile de revenir sur les notions de base, d'autant que, dans la pratique, des adaptations s'avèrent nécessaires. Vincent Augé fait le point des évolutions actuelles.

Bref historique

Dans les forêts communales du deuxième plateau et de la haute chaîne du Jura, composées d'épicéa, de sapin et de hêtre en mélange, soit environ 25 000 ha rien que pour le département du Jura, la gestion en futaie jardinée est la règle quasi-générale depuis des décennies, voire souvent plus d'un siècle.

Cette gestion est restée longtemps dominée par la recherche d'un état d'équilibre idéal formalisé par des normes, qui préconisaient malheureusement des matériels sur pied trop importants, incompatibles avec le renouvellement diffus et permanent qui est la condition même d'un jardinage équilibré. Aussi a-t-on assisté jusque dans les années 1960 à un vieillissement et à une capitalisation des peuplements, associés à une dégradation de leur état sanitaire.

Dans les années 1980, des études ont mis en évidence, d'abord pour le Haut-Jura, puis pour le Deuxième Plateau, et enfin plus récemment pour les futaies mixtes, les fourchettes de richesse et de structure assurant le meilleur compromis entre production et pérennité des peuplements. Elles ont également abouti à des typo-



Peuplement jardiné de hêtraie-pessière dans le Haut-Jura

V. Augé, ONF

logies, permettant de décrire plus finement les forêts jardinées et leur évolution (Herbert et Rebeiro, 1981 ; Rebeiro, 1993 ; Herbert, non daté).

L'usage de ces outils et les méthodes d'aménagement et de gestion qui en découlent sont désormais généralisés à l'ensemble des forêts jardinées gérées par l'ONF dans la région.

Principes de base

La futaie jardinée nécessite :

- une sylviculture dynamique et fine, fondée sur une **très bonne connaissance de chaque parcelle** (cartographie/typologie des peuplements) ;

- une croissance satisfaisante pour toutes les catégories de diamètre, donc des **peuplements qui ne sont pas trop denses** ;

- une **régénération en continu**, constituée de semis et perches diffus, qui s'installent sous l'ombrage étagé des arbres adultes et se développeront à la faveur de la récolte des arbres mûrs et du nettoiement des petits feuillus sans valeur (elle n'est pas recherchée sous forme pleine, dans de larges trouées bien individualisées).

L'action primordiale du forestier pour orienter favorablement les peuplements se concrétise donc par la coupe jardinatoire, définie par :

- des **rotations courtes** (6 à 12 ans, 10 ans généralement), qui ne doivent pas prendre de retard ;

- des **prélèvements qui s'appuient sur la production constatée** localement ;

- la réalisation de différentes opérations simultanées lors du martelage : récolte, sélection, régénération, sanitaire.

En complément, des **travaux sylvicoles** (maintien du feuillu dans des proportions souhaitables, dégagement des semis, dépressage des taches denses de

1 - Principales caractéristiques des types de peuplements pour le Haut-Jura

(Extrait du guide régional « les futaies irrégulières résineuses du Massif Jurassien »)

Type A : Futaie jardinée équilibrée, à matériel modéré (16 à 20 m²/ha, soit 150 à 200 m³ commerciaux/ha, après coupe).

Type B : Futaie jardinée riche en gros bois, et diamètres maxima généralement élevés, à matériel généralement assez riche (18 à 26 m²/ha, soit 200 à 350 m³ commerciaux/ha).

Type C : Futaie jardinée claire et jeune : résultant souvent de fortes coupes ou de chablis importants (12 à 16 m²/ha, soit 100 à 150 m³ commerciaux/ha). Régénération et perches souvent très abondantes, gros bois rares.

Type D : Futaie régularisée dans les petits bois, à densité élevée et faible diamètre maximum (dépassant rarement 50 cm).

Type E : Futaie régularisée dans les bois moyens, à densité souvent élevée.

Type F : Futaie régularisée dans les gros bois, pouvant présenter deux faciès principaux :

- **F fermé** : à densité relativement élevée, avec une régénération déficitaire,
- **F ouvert** : en cours d'ouverture, avec généralement des perches installées dans les trouées, mais très peu de petits bois précomptables.

Type G : Futaie résineuse très claire, à structure variable, essentiellement caractérisée par la faiblesse du matériel sur pied (moins de 10 m²/ha, ou moins de 100 m³ commerciaux/ha)

perches résineuses) sont réalisés afin d'accompagner le travail du marteleur.

Comment fixer les objectifs à atteindre ?

L'aménagement est le document de base de tout acte de gestion. Les données dendrométriques constituent l'entrée de base pour l'aménagiste. La règle générale est de réaliser un **inventaire en plein** de la quasi-totalité des parcelles jardinées. Ces inventaires successifs fournissent des données importantes pour apprécier l'état actuel des peuplements et contrôler leur évolution (structure, capital, passage à la futaie, production) puis définir les caractéristiques globales des coupes. Depuis quelques années, des méthodes statistiques sont également utilisées pour quelques forêts dépassant 300-350 ha, en reprenant celles mises au point par nos collègues de l'Ain.

Les typologies mises au point depuis 25 ans couvrent désormais la très grande majorité des contextes locaux. Elles sont d'utilisation très simple (il n'est défini que 7 à 11 types), permettant de réaliser des **descriptions et cartographies de peuplements à l'avancement**, en synthétisant directement sur le terrain la forte hétérogénéité en quelques unités élémentaires (cf. encadré 1). Des données qualitatives supplémentaires sur le niveau de régénération, l'état sanitaire, la concurrence par les feuillus, etc. sont alors notées par type de peuplement (cf. figure 1).

Depuis les années 85, les aménagements sont passés d'une possibilité volume à une **possibilité contenance avec volume présumé réalisable** (VPR). En effet, l'ancienne méthode a conduit à aggraver le vieillissement des peuplements à cause de forts taux de chablis couplés à des possibilités

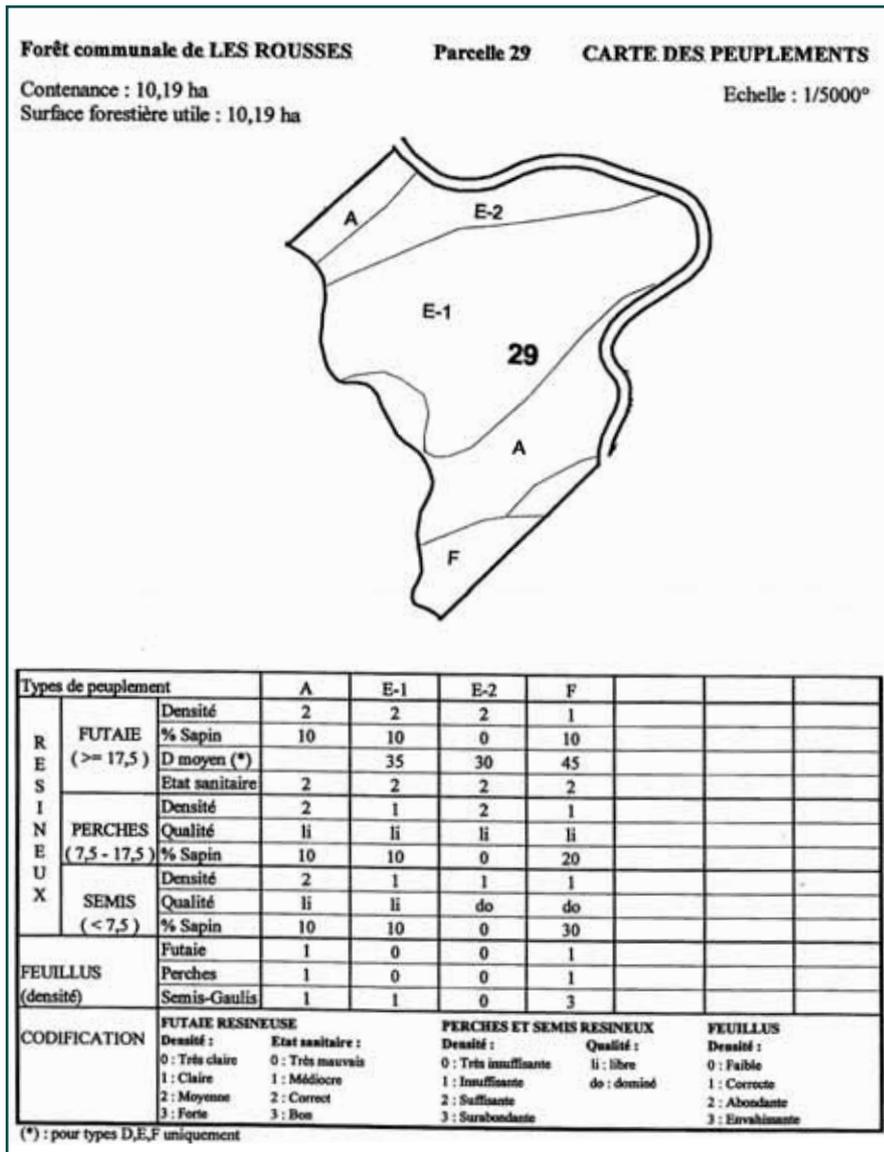


Fig. 1 : exemple de fiche de description

rentes catégories de diamètre pour en assurer l'équilibre. Ainsi doit-on se retenir d'enlever systématiquement tous les arbres mûrs sur toutes les taches de régénération, au risque de transformer la parcelle en coupe de régénération. De même, doit-on se forcer à passer dans un bouquet de bois moyens sans vouloir absolument le purger des deux ou trois petits bois (ou gros bois !) qui croissent à proximité, au risque de régulariser la parcelle.

Cette démarche n'est donc pas « naturelle » à nos esprits cartésiens. Chaque marteleur doit être capable d'analyser instinctivement et en continu le peuplement, pour adapter les consignes générales de martelage au contexte local. La typologie des peuplements, et la cartographie qui en résulte parcelle par parcelle, est d'un grand secours. C'est ainsi la seule façon d'avoir, en début de martelage, une vue d'ensemble de la parcelle, permettant de donner des consignes aussi fines que possible. En revanche, le VPR donné par l'aménagement ne constitue pas une référence incontournable du marteleur, sauf dans de rares cas de peuplements bien jardinés et sains.

Il faut ainsi une **longue expérience de terrain** pour appliquer correctement les consignes et l'apprentissage passe inévitablement par le **travail en équipe** avec des anciens. Malgré toutes les indications données, chaque marteleur reste influencé par les forêts qu'il gère quotidiennement, et possède sa « touche personnelle ». Les renforts de martelage trouvent ici leur limite lorsque les personnes concernées viennent de contextes différents (aspect des arbres, mélange d'essences, état sanitaire, fertilité des sols). Ainsi, il n'est pas rare d'entendre en visite sur une parcelle martelée : « tiens, là je parie que c'est la virée d'untel ! ».

trop faibles. Actuellement, l'aménagiste détermine les VPR en fixant un taux de prélèvement de la production constatée, taux ajusté en fonction du capital, du type de peuplement actuel, et de l'objectif souhaité. La rotation est ajustée afin de rester dans des fourchettes de prélèvement acceptables (<30% du capital avant coupe). Des règles de culture générales parfois complétées de règles ponctuelles précisent les orientations que devront appliquer les marteleurs (cf. encadré 2).

Les coupes feuillues et résineuses sont programmées à des dates dif-

férentes lorsque le hêtre doit être contenu énergiquement. Dans le cas contraire, les martelages sont groupés.

Comment atteindre les objectifs fixés ?

Les martelages

Le martelage est l'intervention fondamentale de la gestion forestière. En futaie jardinée, **les différentes opérations** (récolte, sélection, régénération, coupe sanitaire) se réalisent **lors du même passage sur la parcelle**, et il faut avoir constamment à l'esprit la répartition spatiale des diffé-

2 - Règles de culture

(Extrait du guide régional « les futaies irrégulières résineuses du Massif Jurassien »)

Principes généraux : on visera toujours un **peuplement mélangé** de sapin, épicéa et feuillus, en proportions variables selon la station, afin de faciliter la régénération naturelle, limiter les risques sanitaires et diversifier la production.

Type actuel	Type objectif en fin d'amgt	Règles de culture pour le martelage des coupes résineuses	Niveau global de prélèvement par rapport à l'accroissement
A	A	Essentiellement récolte des gros bois ayant atteint le diamètre d'exploitabilité. Sélection dans les éventuels bouquets de bois moyens	0,8 à 1,2
B	A	Récolte progressive de l'excédent de gros bois Sanitaire uniquement dans les bois moyens, qui sont à préserver au maximum.	1,1 à 1,6
C	A	Eviter de récolter systématiquement les gros bois, sanitaire uniquement dans cette catégorie Sélection légère en bois moyens et petits bois	0,6 à 1
D	A ou (selon densité) E	Sélection énergique dans les petits bois Sélection énergique également dans les bois moyens Dans les gros bois, sanitaire uniquement	0,9 à 1,3
E	A ou (selon Ø moyen) B	Récolte des gros bois ayant atteint le diamètre d'exploitabilité Récolte énergique mais progressive de l'excédent de bois moyens, (raccourcir les rotations si le peuplement est très dense) si possible par trouées de deux ou trois arbres côte à côte en peuplements fermés.	1 à 1,7
F	B ou (selon densité et état sanitaire)	F⇒B (vieillissement pas trop accentué) : récolte progressive de l'excédent de gros bois (raccourcir les rotations si le peuplement est très dense), si possible par trouées de deux ou trois arbres côte à côte lorsque le peuplement est très fermé. Sélection dans les bois moyens.	1,4 à 2
	G	F⇒G (vieillissement irréversible) : coupes de régénération naturelle étalées le plus possible dans le temps. La réinstallation d'un couvert feuillu pourra être nécessaire, notamment sur les stations les plus difficiles.	sans signification
G	C ou (selon densité) D	Sanitaire très léger Eviter de récolter systématiquement les rares gros bois s'ils sont sains.	0,5 à 0,7

Le martelage est, de plus, souvent **compliqué par l'évolution sanitaire des peuplements**. Le vieillissement des peuplements constaté depuis quelques décennies, conjugué à certaines successions d'épisodes climatiques défavorables, peut entraîner une dégradation précoce de l'état sanitaire d'une parcelle, conduisant à des martelages qui se bornent à prélever les arbres dépérissants, au détriment des consignes sylvicoles. Les peuplements

typiquement jardinés ou régularisés bois moyens ou gros bois deviennent ainsi de plus en plus rares, au profit des futaies claires à très claires. Ces martelages sont à faire de préférence par beau temps, afin de bien estimer l'état sanitaire des arbres.

Les travaux

Les travaux sylvicoles en futaie jardinée sont réalisés majoritairement après la coupe des résineux.

Comme pour les coupes, le passage concerne en général **toute la parcelle en combinant plusieurs opérations** en fonction du stade et de l'état de la régénération rencontrée : dégagement, nettoyage, dépressage, éclaircissement. Ces travaux permettent de doser les essences objectif (souvent en luttant contre l'envahissement par le hêtre très dynamique) en conservant les essences rares favorables à la biodiversité, de mettre

Opérations en futaie jardinée / irrégulière		
Surface à travailler = 0 à 30 % de la surface totale (futaie irrégulière feuillue en cours de constitution)	Surface à travailler = 30 à 60 % de la surface totale	Surface à travailler = 60 à 90 % de la surface totale
Concurrence faible FIF1 2 h/ha	Concurrence faible SYL1 6h /ha	Concurrence faible SYL14 8 h/ha
Concurrence moyenne FIF2 5 h/ha	Concurrence moyenne SYL2 10 h/ha	Concurrence moyenne SYL5 12 h/ha
Concurrence forte FIF3 8 h/ha	Concurrence forte SYL3 14 h/ha	Concurrence forte SYL6 15 h/ha
Nb : nettoyage après coupe seul (à éviter)	vol rémanents faible et diffus NET1 4 h/ha	vol rémanents élevé NET2 6 h/ha

Modulation (ne pas cumuler plus de trois modulations)

- distance A + R jusqu'au centre de la parcelle > 1 km : + 10 %
- relief difficile (pente > 40 %, laizines) : + 20 %
- avec abattage de tiges marquées non exploitées : de + 10 % à + 30 %
- avec abattage de perches et brins secs : de + 10 % à + 30 %
- avec entretien périmètre / bord de route : de + 10 % à + 30 %

Fig. 2 : Grille d'estimation 2007 des coûts des travaux sylvicoles

à distance les perches, et de couper les petites tiges martelées non exploitées et les brins abîmés par l'exploitation. L'estimation du coût d'intervention se fait désormais à l'échelle de la parcelle entière selon la grille présentée figure 2.

Comme pour le martelage, **l'expérience des ouvriers forestiers et le travail en équipe** sont essentiels pour la réalisation de ces travaux. Entre autres écueils, il faut **éviter de faire des travaux d'intensité trop forte** contre le feuillu (sa recolonisation est très rapide) et dans les dépressages résineux (casse ultérieure par la neige ou les exploitations).

Bilan des méthodes actuelles et perspectives d'évolutions

Les méthodes d'aménagement et de sylviculture en futaie jardinée n'ont cessé d'être améliorées depuis leur mise au point. Ce mode de gestion est **parfaitement adapté au contexte de la montagne jurassienne**, caractérisé par une mosaïque de stations et de types de peuplements, et à la préservation de la biodiversité (tétrao-nidés...). La souplesse actuelle des aménagements en possibilité contenance permet au marteleur de s'adapter aux contextes locaux sans

être tributaire des chablis passés, et de pouvoir réellement faire évoluer les peuplements. Cette souplesse est malheureusement limitée dans les faits par l'état sanitaire, qui dicte trop souvent le coup de marteau par rapport aux règles de culture idéales.

Affiner encore l'estimation des volumes à prélever

Malgré la prise d'une quantité importante de données, malgré

des calculs de production et de VPR « précis », nous constatons que nos prévisions ne se vérifient pas toujours. Les estimations à l'échelle de la forêt restent fiables, mais les récoltes parcellaires s'écartent de plus de 20 % du VPR prévu dans un cas sur trois. La raison principale semble être l'état sanitaire et les chablis dont l'évolution est difficile à estimer lors de l'élaboration de l'aménagement. L'autre raison est que ces calculs



Travaux sylvicoles (dégagement, mise à distance des hêtres) en FC des Rousses

V. Augé, ONF

utilisent **la production constatée**, qui d'après des analyses récentes est loin d'être constante dans le temps, même lorsque les peuplements sont stables. **La production a tendance à évoluer dans le même sens que le capital sur pied.** En pratique, la consigne est maintenant de ne plus utiliser ces méthodes de calcul lorsque les peuplements ont très fortement évolué entre les deux inventaires, mais de fixer les VPR seulement à dire d'expert. De même, on constate que les productions feuillues sont en nette augmentation, en partie liée à un fort passage à la futaie ; ne tenir compte que de la production constatée conduit inévitablement à des VPR trop faibles si l'objectif est de contenir le hêtre. En revanche, nous n'avons pas encore de recul pour connaître la pertinence de l'estimation des VPR après inventaire par méthode statistique, sans chiffre à la parcelle, et pour lequel la possibilité totale doit être ventilée à dire d'expert par parcelle.

Le traitement en futaie jardinée trouve ses limites en certaines circonstances

L'évolution des peuplements denses à fort pourcentage de gros bois vers des types plus équilibrés n'est pas toujours possible en cas de **vieillesse trop avancé** et de régénération très déficitaire. Le forestier peut alors difficilement contrer le dépérissement généralisé, qui conduit progressivement à des futaies irrégulières très claires, voire exceptionnellement à la mise en régénération de parcelles entières (exemple de la forêt communale de Chaux du Dombief). L'historique de la sylviculture passée est donc très important.

Le traitement en futaie jardinée est également difficile dans les conditions rares de **très grande fertilité** (région au Nord de Champagnole). Ces futaies jardinées très riches (souvent > 350 m³/ha, parfois 500 m³/ha) doivent être décapitali-

sées progressivement si l'on veut espérer ne pas entrer dans le cycle précédemment décrit. Les productions constatées de 10 à 14 m³/ha/an impliquent alors de fixer des VPR très importants (>120 m³/ha) même avec des rotations très courtes de 6 ans, ce qui n'est pas sans conséquence pendant et après les exploitations.

Le hêtre présente une très forte dynamique dans nos forêts (influence climatique ?) et le contenir coûte de plus en plus cher aux propriétaires. La régénération résineuse est ainsi fortement concurrencée et peut devenir très déficitaire. Les niveaux de réinvestissement ne suffisent souvent plus, et il est probable que les peuplements évolueront vers des pourcentages de hêtre beaucoup plus importants.

À l'étage subalpin, nous constatons un très fort **déficit de régénération dans les pessières** traitées en futaie jardinée. Là encore, nous héritons de peuplements qui sont passés par des phases de surcapitalisation. Ce déficit continue malgré la décapitalisation opérée ces dernières décennies. Grâce aux études menées par le CEMAGREF et l'ONF dans les Alpes dans des conditions similaires, nous supposons que le blocage persiste lorsqu'on gère ces pessières pied à pied, comme c'est le cas historiquement dans le Jura. En effet, il est démontré qu'un ensoleillement direct minimal est nécessaire pour que les semis d'épicéa poussent et puissent sortir de l'épaisse couche de neige. La forêt du Syndicat Intercommunal du Massacre dans le Jura en est un bon exemple. L'aménagement en cours de révision va ainsi prévoir le **passage à un traitement par bouquets**, avec l'ouverture programmée de trouées dans les peuplements vieillis pour que la régénération s'installe enfin.

Apprécier la pertinence des règles de culture

Enfin, les méthodes actuelles ne permettent pas d'être très réactif sur d'éventuels besoins de réorientation des règles de culture. En effet, le contrôle de la sylviculture pratiquée n'est actuellement fondé que sur quelques critères chiffrés (passage à la futaie, proportion des différentes catégories de diamètre, production constatée) et, depuis l'utilisation des typologies de peuplement, de critères qualitatifs (niveau de régénération, présence de perches, concurrence du hêtre). Il faut bien avoir conscience que ces critères chiffrés ne permettent souvent que de juger la sylviculture pratiquée plusieurs décennies avant les mesures, mais ne donnent rien sur la pertinence de la sylviculture actuelle. Comme ailleurs, nous allons réfléchir à de nouvelles méthodes de contrôle plus fines.

Vincent AUGÉ

ONF, agence du Jura

en collaboration avec

Pierre-Yves LAHAYE

Éric BAJARD

Yves PASCAL

Bibliographie

HERBERT I., 1994. Les futaies irrégulières résineuses du massif jurassien. ONF. 29 p.

HERBERT I., non daté. Typologie des peuplements mixtes des pentes intermédiaires et du deuxième plateau du Jura. Lons-le-Saunier : ONF. 45 p.

HERBERT I., REBEIROT F., 1981. Les futaies jardinées privées des hautes chaînes du Jura. Mémoire de 3ème année ENITEF

REBEIROT F., 1993. Les futaies jardinées du massif jurassien – deuxième plateau et pentes intermédiaires. Thèse : Société Forestière de Franche-Comté.

Martelages en forêt de Thiérache

Brice de Turckheim, expert forestier honoraire, travaille activement et depuis longtemps à la promotion de la « futaie irrégulière continue et proche de la nature ». Il témoigne ici des résultats obtenus en forêt privée de la Thiérache, dans l'Aisne, en insistant sur les conditions pratiques (organisation, formation) de la réussite.

Contexte et sylviculture passée

La forêt privée du Groupement Forestier de la Thiérache est située à l'extrême nord du département de l'Aisne, dans la région naturelle de Thiérache, laquelle s'étend, en outre, dans le Nord, les Ardennes et en Belgique. Elle comporte deux massifs séparés de 7 km, d'un total de 2 500 hectares environ. Les stations forestières y sont « super-riches » sur limons profonds, avec des précipitations de l'ordre de 880/900 mm par an, très bien réparties sur toute la saison de végétation. Le relief est pratiquement plat, à l'exception des pentes dominant la vallée de l'Oise.

Les peuplements étaient traditionnellement traités en taillis-sous-futaie, à la rotation de 30 ans, comportant au moins une dizaine d'essences principales, les dominantes étant, selon la microstation, le chêne pédonculé, le frêne, le sycomore ou l'aulne. Au cours de la guerre de 1914-1918, la forêt a été gravement surexploitée par les troupes d'occupation, près de vingt possibilités ayant été récoltées en quatre ans. Les coupes des décennies suivantes ont été prudentes. Elles ont permis la reconstitution partielle du matériel producteur.

L'aménagement de 1963, dans l'esprit de l'époque privilégiant la production de grandes quantités de



Evrard de Turckheim

Un aspect de la futaie irrégulière actuelle, avec gros bois de qualité

bois d'industrie, prescrivait la transformation, en trente ans, d'un tiers de la forêt en futaie résineuse, principalement d'épicéa commun, et d'un tiers en peupleraie. Le tiers resté en taillis-sous-futaie était classé en attente en vue d'une transformation ultérieure.

Réorientation de la sylviculture

Une révision complète de la gestion a été initiée à partir de 1984, sur la base des principes suivants :

- arrêt complet des coupes à blanc-étoc suivies de plantations résineuses ; n'ayant pas donné les satisfactions escomptées, les plan-

tations de peuplier avaient déjà été stoppées vers 1972-73 ;

- arrêt complet des coupes de taillis et de taillis-sous-futaie traditionnelles ;

- conversion de la totalité des peuplements en *futaie irrégulière continue et proche de la nature* (FICPN) : les coupes sont de type jardinatoire à la rotation de 8 ans, évitant, dans la mesure du possible, tout sacrifice d'exploitabilité par la récolte, soit trop tôt d'un bon producteur, soit trop tard d'un arbre suranné.

La courte périodicité des coupes permet de donner à chaque arbre sa chance sans craindre de le perdre avant le prochain passage.

La nécessaire rationalisation de l'aménagement impose la schématisation aussi poussée que possible des **unités de gestion**. Celles-ci sont constituées de parcelles entières, passées à période fixe, sur la totalité de leur surface, quelle que soit la variabilité des stations et celle des peuplements. Par contre, dans la recherche de la productivité financière la plus élevée possible, les **unités d'intervention**, le petit bouquet ou même l'arbre individuel, varient de place en place. Les interventions s'adaptent de la manière la plus sensible à chaque situation particulière. N'est constant que le changement et toute formalisation, modélisation, uniformisation ne pourraient qu'entraîner des pertes de productivité. La gestion de l'imprévisible nécessite des interventions prudentes « selon la stratégie du chevreuil, des petits pas ». Il n'est pas indispensable de se préoccuper de ce qui se passera dans 8 ans : à chaque intervention sa réflexion.

Nouveau plan de gestion – règlement d'exploitation

Afin d'appliquer cette nouvelle sylviculture, le plan simple de gestion a réorganisé la forêt en quatre groupes de parcelles en fonction du type de peuplement :

- groupe 1 - taillis-sous-futaie dont le taillis avait plus de 20 ans : ces parcelles sont parcourues par des coupes d'éclaircie jardinatoires à la rotation principale de 8 ans, avec une rotation intermédiaire facultative de 4 ans ;
- groupe 2 - taillis-sous-futaie de moins de 20 ans : ces parcelles ne sont pas parcourues tant que l'âge du taillis n'a pas atteint 20 ans (dès cet âge atteint, elles sont incorporées au groupe précédent dans le cycle des 8 ans) ;
- groupe 3 - les perchis et jeunes futaies résineuses ; les peuplements sont éclaircis en faveur des meilleurs individus avec déjà un souci d'étaler les récoltes. Les

Exercice	Nombre de parcelles à parcourir	Âge du taillis	Surface totale
1985/86	2	42/43 ans	40 ha
1986/87	6	24 à 46 ans	81 ha
1987/88	5	29 à 38 ans	90 ha
1988/89	9	15 à 28 ans	115 ha
1989/90	8	21 à 24 ans	106 ha
1990/91	6	20 à 23 ans	106 ha
1991/92	6	20 à 22 (8 ans)	99 ha
1992/93	6	19 à 20 ans	74 ha
1993/94	6	8 ans	98 ha
1994/95	6	8 ans	120 ha
1995/96		8 ans	101 ha
etc.			

Tab. 1 : programme des coupes d'éclaircie, séries 1 et 2 (1 451 ha dont 680 ha d'anciens taillis-sous-futaie)

L'ancien aménagement en taillis-sous-futaie comportait la récolte sur deux parcelles par an, soit 40 à 45 ha.

feuillus qui s'installent naturellement sont conservés voire aidés ;

- groupe 4 - cas particulier des peupleraies de Fritz Pauley : elles sont éclaircies en faveur du recru de feuillus autochtones précieux.

Réalisation pratique

Nous présentons ici en détail la sylviculture mise en œuvre dans le groupe des taillis-sous-futaie conduit en conversion en futaie irrégulière, continue et proche de la nature.

Préparer les peuplements et les intervenants

Lors des premiers entretiens avec le personnel de gestion, convaincu que seules des coupes à blanc de taillis étaient commercialisables, il a été nécessaire de consentir de gros efforts de persuasion, et même d'autorité, pour obtenir le changement d'esprit et de pratique. Il était fondamental de faire comprendre que la production financière des peuplements était réalisée par un nombre relativement faible d'individus, qu'il ne fallait ni sacrifier, ni isoler brutalement. Ce qui a été accepté facilement. Mais il ne paraissait pas pos-

sible aux responsables de terrain de trouver des amateurs de coupes d'éclaircies et de couper un faible nombre de tiges en conservant sur pied la majorité des perches de sous-étage.

Le problème a été résolu en trois étapes concomitantes :

- ouverture de cloisonnements d'exploitation de 3 (à 4) mètres de large, distants d'axe en axe de 25 m, perpendiculaires aux routes de desserte ;
 - dans les bandes, coupe plutôt de grosses perches sans s'occuper des petites perches dominées ; les cloisonnements étant définis et ouverts au préalable, ces perches étaient abattues de préférence en leur direction, ce qui réduisait leur manutention à une distance de 6,25 m ;
 - renonciation à tout travail de « propreté », recépage d'épines ou de noisetier, mise en tas ou en andain, ou même incinération. Il fallait insister pour que soit accepté que « en forêt la propreté est un vilain défaut » ;
- De cette manière, le rendement du travail en stères par jour était sensiblement augmenté, puisque moins de tiges fournissaient plus de stères.

Les directives concrètes de martelage, uniquement en abandon, étaient données par strates.

Les consignes de martelage dans l'étage dominant

La première consigne est de récolter les arbres ayant atteint ou dépassé un diamètre objectif d'exploitabilité, et dont l'état végétatif n'est pas satisfaisant. Les diamètres d'exploitabilité sont donnés par essence et par qualité (cf. tableau 2).

Un problème difficile est celui de l'évaluation des frênes, et notamment ceux des classes de DHP (diamètre à hauteur de poitrine) de 60 à 70 cm. Si, à l'aspect extérieur sans sondage (écorce, couronne, branches, absence de blessures), l'opérateur juge qu'un arbre peut encore être blanc mais que son cœur risque de brunir, on le récolte sans état d'âme. S'il est jugé brun mais en bon état végétatif il est réservé ; mais de très gros arbres ayant dépassé 75 à 80 cm, sont récoltés. La surface à parcourir (voir tableau 1) étant importante, et tous les taillis-sous-futaie ayant été parcourus en 8 ans, cette stratégie a permis de réaliser en un temps court, entre 1985 et 1993, un volume important de gros frênes. À l'époque, la chute de la valeur de ces gros bois (- 50 % entre 1990 et 1996) n'était pas prévue, mais leur récolte a permis de mobiliser en quelques années des sommes très importantes, qui auraient été perdues ultérieurement, sans aucune contrepartie, et qui ont permis, notamment, de financer un programme ambitieux de construction de routes et de places de dépôts.

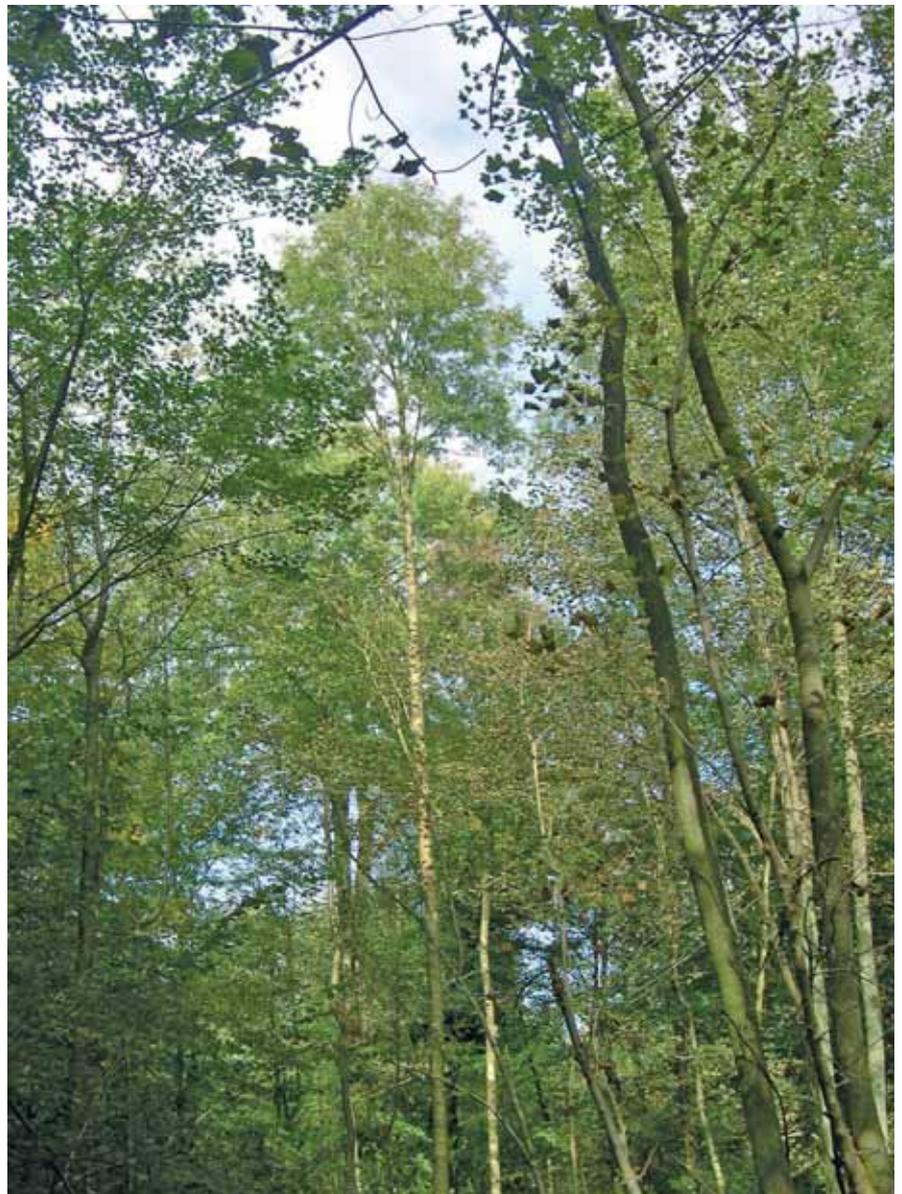
La deuxième consigne est l'abandon d'arbres de qualité médiocre concurrençant des tiges de belle qualité. Cette opération s'apparente à une coupe d'amélioration tout à fait classique. Pour le choix des arbres, on ne tient compte

Qualité de la bille de pied	A	B	C	D
Chêne/hêtre	80-100	70-80	50-60	Le plus tôt possible sous réserve d'absences d'autres fonctions
Frêne blanc	60-65			
Frêne gris	80	70	50	
Sycomore	80	70	50	
Aulne/bouleau	50-55	40-45	35-40	
Merisier	70-75	60	50	

Tab. 2 : diamètres d'exploitabilité (diamètre à hauteur de poitrine, ou DHP, en cm)

prioritairement que de leur vitalité et de leur qualité, et second lieu seulement de leur essence. Un très beau bouleau peut être

favorisé par le sacrifice d'un frêne de qualité moyenne, sans état d'âme. Toutefois des essences rares – le chêne, par exemple,



Futaie claire feuillue, avec perches d'avenir (frêne)

Evrad de Turckheim

dans certaines situations — peuvent être favorisées même en cas de qualité médiocre, en vue de la stabilité et de l'ensemencement futur. La variabilité des stations étant importante par suite même de très modestes variations d'altitude (une dépression de 1 ou 1,5 m à peine détectable à l'œil pouvant faire passer de la chênaie à la frênaie, ou même à l'aulnaie), on a renoncé à la cartographie de ces stations. Mais les opérateurs ont la faculté de s'adapter très finement à ces variations, privilégiant ici un chêne ou un frêne et, 15 à 20 m plus loin, un aulne. Les distances d'arbre à arbre sont tout à fait secondaires dans la prise de décision.

Troisièmement, on n'a pas renoncé à provoquer de petites trouées, qui ont donné lieu, ensuite, à des plantations d'enrichissement par bouquets d'essences précieuses et minoritaires, notamment de merisiers et de chênes.

Enfin, des arbres fortement tarés ou mourants sont systématiquement réservés. Pour éviter qu'ils ne soient coupés par des bûcherons bien intentionnés, pouvant présumer un oubli ou une négligence, ces arbres sont toujours marqués à la griffe ou à la peinture (R pour réservés, P pour "Pic"). De même, certains gros arbres très médiocres ou mauvais, sans valeur économique élevée, sont également réservés en leur qualité d'arbres « écologiques ». Il va de soi qu'un très bel arbre, de haute valeur, sera récolté même s'il comporte un trou de pic. La distinction est faite entre HLM et HLC, habitation à loyer modéré ou à loyer cher : le propriétaire peut se payer des HLM, mais pas de HLC. Mais en réalité les conflits entre fonction écologique et fonction économique des arbres sont rares.

Les consignes de martelage dans le sous-étage.

La première recherche est celle de la belle tige du petit secteur examiné (12 à 20 m de diamètre), celle-ci devant être de bonne vitalité, rectiligne et bien élaguée sur un quart à un tiers de la hauteur totale à espérer. Les fourches en V serré ne sont pas tolérées pour les arbres d'avenir, car ils risquent de se fendre par fort vent ou lors de leur récolte ; celles en U peuvent l'être si ce U est à une hauteur supérieure à la future bille de pied de qualité. Toutes les essences peuvent fournir des tiges d'avenir, mais la priorité suivante a été pratiquée : chêne, merisier, frêne, érable sycomore ou plane, aulne, bouleau, charme, en tenant compte de l'adaptation à la microstation.

Le choix de ces tiges d'avenir doit également tenir compte de l'environnement direct : il n'est pas utile de désigner une très belle perche immédiatement à côté d'un chêne pouvant encore produire pendant 60 ans. Mais près d'un frêne à couper dans une ou deux rotations, cette désignation assurera la continuité harmonieuse de la production, et amènera une réduction apparente, pouvant être très élevée, de la rotation des capitaux (ou de la durée de production apparente).

Ces tiges d'avenir sont marquées à la peinture, autant comme guide pour le martelage en abandon exécuté dans la foulée, que pour indiquer aux exploitants (bûcherons, débardeurs, acheteurs de bois de feu) les tiges à respecter strictement et pour attirer l'attention, lors des soins cultureux ultérieurs, sur une éventuelle branche à élaguer.

Après l'opération de désignation des arbres d'avenir, qui est de loin la plus importante de tout le martelage, le choix des tiges à enlever est relativement facile. Ces tiges

sont toujours marquées en abandon, ce sont :

- les tiges dont les houppiers gênent le plus les tiges d'avenir, car une fois que la future grume est formée et élaguée sur le quart ou le tiers de la hauteur future totale, le houppier doit pouvoir se développer pratiquement sans concurrence, en croissance quasi libre ; cette éclaircie permet aussi la constitution ou la reconstitution d'un sous-étage fonctionnel, éliminant la strate herbacée et même les ronces ;

- les tiges qui montent autour des houppiers des arbres de futaie et risquent de faire mourir des branches ; par contre, de petites perches enveloppant le tronc des grands producteurs sont strictement conservées, même si éventuellement elles montent dans la partie de la couronne sans feuilles ;

- les tiges, souvent couvrantes, dont la coupe permettra le démarrage de semis ;

- les tiges de sous-étage plutôt grosses et de qualité médiocre, sans accroissement réel de valeur, pour créer de petites trouées à replanter avec des plants d'essences précieuses.

L'organisation des martelages

Les martelages sont, en général, effectués par équipes de quatre, deux techniciens et deux bûcherons. L'avis de ces derniers est souvent très important pour décider de la direction de chute d'un arbre, et même pour déterminer la ou les tiges à sacrifier prioritairement par la chute d'un grand arbre pour en préserver d'autres. La direction de chute est souvent imposée par la marque de flèches à la griffe, de même que l'éhouppage éventuel de certains gros arbres pour préserver des belles tiges d'avenir.

Les opérations de martelage sont un moment privilégié de formation, de réflexion, pour les intervenants. Dans l'optique de transmission de savoir et d'expériences, de

l'optimisation de l'ensemble des opérations de gestion et de la rationalisation de l'entreprise, il nous paraît contre-productif de chercher à économiser du temps de martelage. Avec une dépense de 70 à 80 €/ha tous les 8 ans, quelques centimes dépensés en sus peuvent avoir des effets sur la productivité des peuplements et sur la motivation du personnel qui sont un grand multiple de ces surcoûts. C'est à cette condition aussi que le maximum de décisions peuvent être déléguées aux techniciens, et même aux exécutants.

Lors du martelage, la direction de chute est souvent imposée par la marque de flèches à la griffe, de même que l'éhouppage éventuel de certains gros arbres pour préserver de belles tiges d'avenir.

En raison de l'imprévisibilité de chaque situation particulière et de son évolution, la liberté de décision des opérateurs doit rester très grande. Il ne faut pas hésiter à réfléchir pendant quelques instants avant de prendre une décision importante, et même demander leur avis à des voisins de martelage, ou donner son avis sur des interventions prévues ou à opérer par un voisin. À quatre, six ou même huit yeux on voit souvent mieux, et à 2 ou 3 cerveaux la réflexion est plus riche qu'avec deux yeux et un seul cerveau.

Le volume à couper n'est jamais imposé ou déterminé à l'avance ; il se constate après le martelage. Ce qui n'empêche pas son estimation très grossière avant coupe pour avoir une idée de la récolte globale. Les volumes exploités se situent, en grande moyenne, aux environs de 20 % du volume sur pied avant coupe, ce qui correspond à un prélèvement de 2 à 2,5 % par an, ou 15 à 25 m³ de bois d'œuvre et 30 à 40 m³ de bois d'industrie ou de feu par hectare, soit 5 à 8 m³/ha/an.

Massifs	Massif 1		Massif 2	
	1993	2003	1992	2002
Volume m ³ /ha	159	216	169	201
dont chêne	46	52	35	39
frêne	22	23	41	44
érable	27	32	24	29
aulne	16	17	13	12
résineux	25	59	7	19
Gros bois ≥ 53 cm DHP	46	58	49	63
Bois moyens 33/52 cm DHP	44	69	58	63
Petits bois 18/32 cm DHP	49	71	43	58
Surface terrière m ² /ha	16	20	16	19

Tab. 3 : résultats d'inventaires par placettes permanentes

Résultats

Le résultat global de cette sylviculture est contrôlé au moyen d'inventaires par placettes permanentes, au nombre de 200 environ par massif, comportant un petit cercle de 2 ares, dans lequel toutes les tiges sont comptées à partir de 10 cm de diamètre, concentrique avec un grand cercle de 8 ares, ou seules les tiges d'un DHP égal ou supérieur à 30 cm sont inventoriées. Outre l'essence et le diamètre au centimètre près, sont relevés la qualité de la tige, sa vitalité et sa position sociale. En outre, sur chaque placette sont mesurés le volume de bois mort et ses dimensions, la présence de régénération (hauteur, qualité, densité) l'envahissement et la densité de la ronce. Les principaux

résultats après trois inventaires et leur comparaison sont récapitulés au tableau 3.

Pour un volume sur pied de 129 m³/ha de bois fort, taillis compris, en 1983, les coupes ont prélevé 121 m³/ha en 20 ans tandis que le volume moyen, pour les deux massifs, passait à 206 m³/ha et le volume des gros chênes de 27 à 39 m³/ha. Sur l'ensemble des deux massifs (2 500 ha), les prélèvements ont évolué comme indiqué au tableau 4.

Il est remarquable de constater que le pourcentage de bois d'œuvre par rapport au volume total exploité, qui était traditionnellement de l'ordre de 22-25 %, augmente régulièrement jusqu'à environ 40 % après vingt ans de ce

Récoltes	m ³ /ha		% BO	
	BO	BC/BI	Total	
1985/89	7,51	23,45	30,97	24
1990/94	7,95	20,36	28,32	28
1995/99	8,59	15,92	24,51	35
2000/04	10,08	12,35	22,43	45
Total	34,13	72,10	106,23	32
Soit par an	1,71	3,60	5,31	

BO = bois d'œuvre ; BC = bois de chauffage ; BI = bois d'industrie

Tab. 4 : évolution du prélèvement pour les 4 périodes quinquennales



Evvard de Turckheim

Grumes feuillues triées, rassemblées bord de route pour vente par soumission

traitement. Et il ne semble pas exagérément optimiste d'atteindre 60 ou même 65 % lorsque les peuplements se trouveront en équilibre. Le volume moyen de la grume de bois d'œuvre a toutefois diminué, par suite du "passage à la futaie" de nombreuses perches de sous-étage qui, dans le traitement en taillis-sous-futaie, auraient été réalisées en bois de feu avant d'atteindre un DHP de 35/40 cm. Actuellement, le volume équilibre n'est pas encore connu. Il pourrait se situer vers 220/230 m³/ha, dont 50 % ou même plus -en volume- de bois de plus de 52,5 cm de DHP.

Difficultés... et solutions

Il est inutile de revenir sur l'impérieuse nécessité d'une bonne formation permanente et continue de tous les intervenants, signalée plus haut à plusieurs reprises.

En raison de la grande variété des produits, couplée avec un prélèvement relativement faible par hectare, mais sur des surfaces importantes (chaque année 1/8^e de la surface totale), il est apparu très rapidement que le mode traditionnel des ventes de coupes sur pied ne pourrait satisfaire ni le vendeur

ni l'acheteur. Le temps nécessaire à l'acheteur pour visiter et estimer les coupes, et ensuite pour les exploiter se traduirait pour le vendeur par une moins-value sur le prix de vente tout à fait inacceptable. D'autre part, la nécessaire qualité d'exploitation, visant à la fois le soin au peuplement restant et la préservation d'un sol très délicat, interdisant notamment le débardage en période humide, a poussé le propriétaire à prendre la maîtrise totale de l'exploitation. En conséquence, le groupement forestier s'est chargé, dès le début de la réorientation sylvicole, de l'ensemble des travaux de débardage, exploitation, tri et regroupement des bois d'œuvre. Il a pu, ainsi, sélectionner les meilleurs prestataires de service, leur assurant la continuité du travail et même des rémunérations plus favorables en instituant un régime de primes pour bon travail.

Des lots homogènes en essence, en grosseur et en qualité, ont été constitués. Un lot de frêne de qualité B regroupait, par exemple, tous les frênes provenant de toutes les coupes sur 1/8^e de la surface. Grâce à leur présentation en bordure de route, les amateurs

pouvaient les visiter et les estimer de la manière la plus confortable possible, certains même parfois sans sortir de leur voiture. Et la livraison en usine pouvait être fortement accélérée. Les bois de valeur sont vendus par appel d'offres et en vente groupée avec d'autres vendeurs. Les bois courants, ainsi que le bois d'industrie ou de feu sont vendus par contrats après discussion amiable, le bois de feu souvent même à des utilisateurs – façonniers privés.

Le martelage des coupes, en forêt de Thiérache, comme ailleurs, est une opération centrale de la sylviculture. Il nécessite un personnel bien formé, motivé, patient, responsable, et qui est poussé, lors de ce travail, par des objectifs d'excellence et d'amélioration de la productivité de la forêt, mais non pas par des objectifs de rendement par hectare et par jour de travail, ni de rendement en mètres cubes par jour ou par hectare. Le plein effet de cette opération ne se conçoit toutefois pas, ou difficilement, hors du cadre global de la gestion, comportant en même temps la bonne solution des problèmes d'exploitation, de commercialisation, de création et d'entretien des routes et des pistes de débardage. Les agents sont responsables de l'excellence de l'ensemble des travaux, et un souci spécial est donné à la continuité dans leurs postes.

C'est ainsi que le rendement financier, aussi bien à court, à moyen et à long terme, pourra être garanti dans les meilleures conditions, tout en assurant les fonctions paysagères écologiques et protectrices de la forêt, et l'épanouissement de l'ensemble des acteurs, des propriétaires et de la société.

Brice de TURCKHEIM

Expert forestier honoraire
Président de Pro Silva France

Conversion en futaie irrégulière en Haute-Marne

L'expérience de l'unité territoriale d'Auberive

Voici un autre témoignage sur la gestion en futaie irrégulière des peuplements feuillus, dans le cas des anciens taillis-sous-futaie sur plateaux calcaires dans la région d'Auberive. Après 12 ans de pratique, la technique est bien rodée... avec des forestiers très motivés.

Le contexte géographique et écologique des forêts

L'ensemble des forêts de l'unité territoriale d'Auberive est situé dans la partie du plateau de Langres entaillée par les vallées de l'Ource, de l'Aujon et de l'Aube (bassin de la Seine), de la Tille de Villemervry et de la Tille de Villemoron (bassin du Rhône).

Les différents faciès de ces plateaux calcaires sur marnes, et de nombreuses combes, souvent profondes, induisent une importante variabilité des expositions et des stations forestières ainsi qu'une grande richesse en milieux biologiques et écologiques particuliers (reculées froides, marais tufeux...). Il existe une importante diversité des stations avec une grande variabilité (d'ordre décamétrique).

Le climat y est de type semi-continentale avec des contrastes thermiques très marqués et des précipitations abondantes (900 mm/an en moyenne sur la période 1961-1994 pour la station d'Auberive). La région d'Auberive est la plus froide du département ; il existe des microclimats liés aux combes, déterminants pour le choix des essences objectif, avec de fréquentes gelées tardives et précoces préjudiciables aux plantations et aux semis en



J.J. Bourteaux, ONF

Des peuplements issus de TSF

milieux ouverts. Enfin des sécheresses estivales et automnales ne sont pas rares à cause de la faible rétention en eau des sols superficiels.

Les caractéristiques des peuplements

Un tiers des peuplements sont réguliers ; la conversion en futaie régulière a commencé en 1880 en forêt domaniale d'Auberive, il s'agit donc de futaies plus ou moins jeunes de hêtre, souvent pures car conduites selon une sylviculture trop conservatrice.

Les deux autres tiers des peuplements sont issus de taillis-sous-futaie plus ou moins enrichis, avec des hauteurs totales qui peuvent varier de 10 m sur les stations les plus médiocres à 30/35 m dans les meilleures conditions. Ce sont ces peuplements qui font l'objet de la gestion en futaie irrégulière que nous présentons dans cet article.

La surface terrière moyenne de ces peuplements issus de taillis-sous-futaie (TSF) est de l'ordre de 16/18 m²/ha auxquels il faut ajouter 3-4 m²/ha de taillis et perches.

Leur structure moyenne est la suivante : 30 % PB (petits bois : 20-25), 50 % BM (bois moyen : 30-45) et 20 % GB (gros bois, 50 et +). Cette structure moyenne ne rend pas compte des disparités locales et ne contribue donc pas à l'élaboration des consignes de martelage pour une parcelle donnée. Mais elle donne des indications sur l'évolution des peuplements à l'échelle de la forêt d'un aménagement à l'autre.

Les essences qui composent ces anciens TSF se répartissent ainsi (proportion en surface terrière) : 40 % de hêtre, 34 % de chêne ; 6 % charme, 2 % d'érable champêtre et 18 % d'érables sycomore et plane, alisiers torminal et blanc, frêne et merisier. On a donc affaire à des peuplements mélangés avec un « stock » de perches de qualité disponibles.

Au départ de la conversion de ces peuplements en futaie irrégulière, des placettes permanentes (voir plus loin la question du contrôle) ont permis de constater qu'il y avait 30 % de qualité A et B (réelle pour les gros bois et potentielle pour les bois de plus petites tailles, ceci sur le 1^{er} billon de 3 m après l'analyse des défauts extérieurs uniquement). Il s'agit de qualité « sur pied » qui n'intègre pas les défauts internes.

Convertir les anciens TSF en futaie irrégulière : les objectifs

Compte tenu des caractéristiques des peuplements et du milieu telles qu'on vient de les décrire, le gestionnaire a choisi de traiter (convertir) ces peuplements issus de taillis-sous-futaie en futaie irrégulière. Ce traitement est en effet bien adapté aux peuplements mélangés d'essences diverses aux âges d'exploitabilité très différents dans lesquels on trouve des tiges de tous diamè-



J.J. Bourteaux, ONF

Coupe d'ouverture du cloisonnement

tres. Dans ce contexte, la futaie irrégulière permet d'éviter les sacrifices d'exploitabilité.

À long terme (non pas au terme de l'aménagement en cours) la structure objectif à l'échelle de la forêt est la suivante : 20 % PB, 30 % BM et 50 % GB. Afin de maintenir un bon niveau de production tout en permettant le renouvellement continu des peuplements, le capital sur pied, en surface terrière après coupe, doit être de l'ordre 14-18 m²/ha de tiges précomptables à quoi s'ajoutent 1-2 m²/ha de taillis et perches. Pour la composition, l'objectif serait d'arriver, en surface terrière, à 60 % de hêtre, le reste en chêne et autres feuillus.

L'augmentation de la part des gros bois (de 20 % aujourd'hui à 50 % à long terme) est un objectif prioritaire. Il ne faut pas pour autant provoquer des sacrifices d'exploitabilité en conservant trop longtemps des gros bois au diamètre d'exploitabilité déjà atteint (risque de perte de qualité), mais conserver progressivement plus de bois moyens pour les laisser grossir.

Pour conduire la structure actuelle des peuplements vers son objectif et l'y maintenir, il est important de s'assurer du passage à la futaie et de le quantifier par un suivi *ad hoc* ; d'où la mise en place, dès le départ, d'un dispositif de placettes permanentes (voir plus loin la question du contrôle).

Les grandes étapes

La sylviculture pratiquée sur l'unité territoriale d'Auberive est avant tout une sylviculture de **conversion du taillis-sous-futaie en futaie irrégulière**. Elle présente donc des interventions dont la nature est spécifique à la conversion, et que l'on ne retrouverait pas en gestion courante de futaie irrégulière.

Installer le réseau de cloisonnement

Il s'agit d'une étape importante qui conditionne en grande partie la qualité des exploitations ultérieures : les chauffeurs d'engins de débardage doivent repérer très rapidement les cloisonnements, axes de circulation privilégiés. Lors



Choix difficile

J.J. Boutteaux, ONF

Travail dans une cèpée.
Coupe de « nettoyage »

J.J. Boutteaux, ONF



Aspect après coupe

J.J. Boutteaux, ONF

des premiers passages en coupe il peut arriver que le porteur doive entrer dans la bande et sortir par le même itinéraire ; avec le temps, il sera plus facile d'exiger un abat-tage directionnel vers les cloisonnements, et les engins n'auront plus (ou rarement) à circuler en dehors des chemins de vidange.

Le réseau de cloisonnement systématique s'appuie sur le réseau de chemins existant ; il le complète, en procédant comme suit :

- les cloisonnements doivent être visibles : suffisamment ouverts (3,5 m à 4 m de large) et repérés par des guidons de peinture (peinture glycéro : tenue 10 ans minimum) ;
- l'entraxe est de 25 à 30 m ;
- les cloisonnements sont d'abord ouverts par une coupe spécifique : cela facilite par la suite la réalisation et le suivi de l'exploitation en plein, avec une meilleure visibilité des cloisonnements pour les bûcherons et débardeurs. Même si cela fait une coupe de plus, le gestionnaire est gagnant sur le plan de la qualité et du temps à passer pour surveiller la coupe suivante (sachant que la surveillance de la coupe de cloisonnements est aisée).

Première coupe de conversion, le « nettoyage » du peuplement...

Le premier passage en conversion, appelé localement « nettoyage », se produit dans notre cas après une phase de vieillisse-

ment du peuplement de 30 à 40 ans après la dernière vraie coupe de taillis sous futaie (durant cette période, une ou deux coupes ont pu être réalisées : coupe sanitaire ou amélioration prudente dans la futaie, en général). Les peuplements parcourus présentent souvent du taillis exploitable d'un diamètre de 8 à 20 cm avec de la futaie plus ou moins dense.

Le nettoyage consiste à retirer les bois médiocres, taillis et futaie de mauvaise qualité, et à constituer un lot de bois d'industrie. Cette action a pour conséquence indirecte de structurer verticalement le peuplement. Dès cette étape, **le travail dans le taillis est fondamental** : il participe au réglage fin de la lumière dans le peuplement qui conditionne l'installation de semis (« salle d'attente » du renouvellement). Ce nettoyage permet aussi d'augmenter le pourcentage de qualité dans le peuplement : il y a un transfert d'accroissement sur la bonne qualité (notion d'amélioration).

Pratiquement, les consignes de martelage représentent le « meilleur compromis » entre la sylviculture et le lotissement pour la vente. Le travail consiste à :

- griffer en abandon des 2 à 3 plus gros brins par cèpée ; le travail se fait par le haut, en pensant à l'accessibilité des tiges pour le bûcheron ;
- griffer en abandon des brins de taillis qui montent dans les houp-



J.J. Boutteaux, ONF



Repérages particuliers : tige de qualité et arbre « bio »

J.J. Boutteaux, ONF

piers des futaies ; ils sont très agressifs pour les branches basses des houppiers ;

■ marteler les futaies de qualité C ou D.

Le prélèvement ainsi obtenu est de l'ordre de 25 à 45 m³/ha (bois fort) pour une surface terrière de 3 à 5 m²/ha.

Parallèlement, le martelage consiste aussi à :

■ repérer par un point bleu les tiges de qualité : tiges d'essences adaptées à la station et produisant actuellement ou potentiellement de la qualité A ou B ;

■ repérer par une étoile les arbres de qualité A ou B dont la récolte est urgente (voir paragraphe suivant) ;

■ repérer par un triangle pointe en bas des arbres à fonction écologique.

Ce repérage figure aux clauses particulières de la coupe afin de s'assurer de la protection des arbres concernés.

... et l'inventaire de la ressource rare

Au cours de ce martelage, on réalise également un inventaire des gros bois de la ressource rare ; comme illustré sur la figure 1, ils sont notés (position, essence, diamètre, qualité) sur un plan détaillé de la parcelle. De la même manière, on inscrit sur ce plan les arbres de qualité A ou B dont la récolte est urgente. Les hêtres et les chênes de diamètre 60 et 65, quant à eux, sont inventoriés et annoncés par qualité, mais pas cartographiés.

Cet inventaire permet de connaître le stock de bois mobilisable et de réaliser des récoltes ciblées en fonction de ce stock 1 à 4 ans après la coupe de nettoyage. Ce décalage est dû aux modes de ventes pratiqués localement (bois sur pied et régie). Ainsi 50 % du stock des gros bois inventoriés sont récoltés peu après ce premier passage.

Deuxième coupe : fin du nettoyage et sélection dans les bois moyens

La rotation actuellement prévue entre les deux premiers passages d'une conversion est de l'ordre de 10 ans. Le travail de nettoyage est à poursuivre sur les mêmes bases que précédemment. Lors de ce deuxième passage, l'attention sur la qualité des bois moyens doit être forte : un mauvais bois sera retiré.

On observe à ce moment des semis de 0,5 à 1,5 m.

L'inventaire de la ressource rare est également réalisé dans les mêmes conditions que lors du premier passage en conversion.

Quelques réflexions sur la mise en œuvre du traitement en futaie irrégulière

Consignes « arbre » ou consignes « peuplement » ?

En martelage, on applique des consignes « arbre » prioritaire-

ment : arbre à récolter, à conserver comme tige d'avenir, ou pour la biodiversité... Toutes les tiges sont analysées individuellement et la distance entre tiges de qualité, par exemple, n'est pas un critère prioritaire. Les arbres à fonction écologique sont désignés en fonction des fréquences de rencontre après analyse de leur intérêt lorsque le choix existe. D'une manière générale, « plus un cas est fréquent, plus le marteleur est exigeant ».

Il existe quand même des consignes peuplements lorsque l'on donne une structure ou une surface terrière objectif. Le choix des arbres à garder ou à enlever se fait par arbre, mais le curseur pour le niveau global de prélèvement reste une consigne peuplement : si les trois quarts des arbres sont de qualité C ou D, on ne les enlève pas tous !

Typologie de peuplement ?

Il n'existe pas de typologie de peuplements élaborée pour la

Le point de vue d'un marteleur

Rendez-vous sur la parcelle en équipe : cinq marteaux et un pointeur (crayon optique).

Il faut savoir que pour les parcelles à problèmes (surface terrière insuffisante, problèmes de desserte, dépôt, lotissement etc.) une visite est réalisée dans l'état afin de trouver une solution ou décider de l'ajournement.

L'agent patrimonial doit fournir au responsable de martelage, une fiche de martelage préalablement remplie ainsi qu'un plan de la parcelle le plus détaillé possible (cloisonnements, dépôt...). Il fait un petit commentaire pour décrire la parcelle à marteler (essence objectif, essences présentes, surface terrière moyenne...).

Dès que tout est bien calé le martelage peut commencer.

Le martelage est toujours très vivant et les virées animées.

Nous travaillons toujours à la qualité (pied à pied), en concertation avec le voisin immédiat et en présence de 8 à 12 essences différentes (diversité).

Toutes les opérations se déroulent en même temps en un seul passage (martelage, inventaire, désignation...) mais en ayant à l'esprit que tout ne sera pas réglé en un passage, et que le pourcentage de qualité du peuplement en place doit augmenter après coupe.

Le travail est beaucoup plus intéressant qu'un martelage classique (de futaie régulière) et bien que cela semble difficile, le temps d'adaptation d'un nouveau marteleur à l'équipe est d'environ un mois.

Thierry KAMINSKI

agent patrimonial sur l'Unité Territoriale d'Auberive.

région. Un outil de cette nature serait utile aux gestionnaires pour décrire les peuplements au moment de l'aménagement et en donner la structure. Concernant la composition, l'exercice est beaucoup plus compliqué compte tenu de la diversité des situations.

Dans la gestion quotidienne, pour l'établissement des consignes de martelage ou de travaux, la typologie ne semble cependant pas être une nécessité.

Gestion à la qualité : qu'est ce que c'est ?

Les préconisations sylvicoles étant fortement liées à la qualité des tiges, on parle de « gestion à la qualité ». La qualité récoltée est rare dans les premières coupes de conversion : 3 à 5 % de qualité A ou B sur les volumes mobilisés en régie actuellement. Cette propor-

tion peut et doit s'améliorer dans le temps : « pour avoir des gros bois de qualité, il faut des petits bois et des bois moyens de qualité » ou « du beau bois pousse sur du beau bois ».

La vente de bois de qualité contribue à l'optimisation des recettes.

Règles d'exploitation et de commercialisation

L'objectif de production de bois de qualité passe par des interventions de qualité : les exploitations représentent toujours un moment important de la vie du peuplement (quelle que soit la sylviculture). Un soin particulier doit être apporté au suivi des exploitations par les agents responsables des coupes, pour l'abattage (qualité très hétérogène des équipes de bûcherons, difficultés matérielles à passer et à faire respecter les consignes) comme pour le débardage.

Le lotissement des produits récoltés doit s'adapter aux évolutions du marché du bois. La constitution de lots homogènes en qualité et/ou en essence reste donc une priorité. 10 à 15 % du volume récolté sur l'UT est vendu bord de route : il s'agit des feuillus divers, des chênes et des hêtres de qualité A, B et C. Les ventes de bois sur pied concernent essentiellement le bois d'industrie (et les résineux).

Le contrôle

Les gestionnaires ont besoin de connaître les évolutions des peuplements en capital, structure, composition, qualité, renouvellement (passage à la futaie) suite à leurs interventions. La connaissance des accroissements, aussi, nous est indispensable pour fixer la rotation des coupes et les prélèvements. Une dizaine de réseaux de placettes permanentes ont donc été installés depuis 1998 : 9 réseaux totali-

sant 1 372 placettes sur les forêts du SIGFRA, syndicat intercommunal de la région d'Auberive (8 030 ha), et 1 réseau de 150 placettes en forêt communale d'Arbot (640 ha). Quelques parcelles sont également suivies en inventaire en plein.

La visite des parcelles tous les 4-5 ans par les gestionnaires permet également d'évaluer les évolutions et de s'imprégner d'un certain nombre de situations. Ces visites permettent de valider la date de prochain passage en coupe ainsi que les besoins en travaux (en général l'objectif est de passer à mi-rotation) car même s'ils sont très modérés, ils ne sont pas à négliger : dégagement, nettoyage, élagage de belles tiges d'avenir...

Bilan de 12 années de pratique de la futaie irrégulière sur l'UT d'Auberive

Des avantages

Le traitement irrégulier est un système qui offre une résilience importante en cas de tempête. Au pire, il restera toujours la salle d'attente (semis installés) et les cloisonnements. La prise de risques pour le capital reste limitée : la récolte se fait en continu et le forestier travaille avec un volume à l'hectare raisonnable. Par ailleurs, le coût des intrants est limité : les arbres assurent une fonction d'éducation qui économise des heures de débroussailluse ou de croissant.

De plus, la sylviculture mise en œuvre est très stimulante pour les équipes : la recherche permanente de la qualité dans toutes les interventions, l'évaluation de l'impact de la gestion sur les peuplements motivent fortement les forestiers. Le regard sur les peuplements a évolué, la



Qualité des tiges : un bel alisier blanc

J.J. Boutteaux, ONF



Des échanges fructueux, des forestiers motivés

J.J. Boutteaux, ONF

remise en question est permanente et les échanges nombreux au sein de l'équipe.

Mais le système reste réversible : une autre sylviculture pourrait être mise en œuvre, si besoin.

et des inconvénients surmontables

La principale difficulté, sur nos stations, est liée à la tendance hégémonique du hêtre : il faut la contrôler en permanence et favoriser systématiquement le mélange au cours des travaux et du martelage pour ne pas laisser le hêtre éliminer les autres essences. Cette prédominance du hêtre peut être atténuée :

- en évitant les densités excessives de chevreuils ou cerfs qui consomment les feuillus divers en priorité ;

- en réduisant la surface terrière à 14-16 m²/ha sur les stations qui le permettent : stations à tendance xérophile ou, au contraire, hygrophile. Cela favorise l'apparition des feuillus divers (plus de lumière = plus de chaleur dans les trouées).

Par ailleurs, la sylviculture préconisée peut paraître complexe, et il est important de garder à l'esprit les objectifs : rechercher une production de qualité et obtenir le renouvellement en optimisant le fonctionnement de l'écosystème. L'ensemble des intervenants doit donc acquérir les compétences correspondantes. La formation continue du personnel est un moyen utile et nécessaire pour s'approprier les nouvelles techniques. Le sentiment de complexité concerne aussi la commercialisation, car la diversité des produits d'une même coupe est un handicap dans un système de vente en bloc : cet inconvénient est très atténué dès lors que la vente en bois façonné est possible.

Du côté du public, enfin, des remarques sont émises sur la présence jugée excessive de peinture en forêt : matérialisation des cloisonnements, points bleus sur les tiges de qualité, triangles sur arbres « bio », etc.

Actuellement, ces repères de peinture sont indispensables pour « roder » avec les différents intervenants (bûcherons, débardeurs) une sylviculture novatrice et exigeante. Mais à terme le marquage s'allégera.

Quelles sont les améliorations possibles ?

D'un point de vue sylvicole, une meilleure maîtrise des populations de chevreuils constituerait l'amélioration essentielle. La situation actuelle n'est pas satisfaisante, les feuillus divers souffrent, le chevreuil éprouvant plus d'appétence pour eux que pour le hêtre.

Dans sa gestion, le forestier serait aidé par un accès rapide aux informations concernant la parcelle et par la possibilité de les mettre à jour ou de les mettre à jour directement sur le terrain (grâce à un outil informatique ?) : l'historique des coupes et des travaux, la prise de notes lors des martelages, la localisation de certaines données. Il s'agit d'optimiser la présence du forestier sur le terrain et la saisie des informations qu'il recueille.

Il serait utile enfin de poursuivre l'amélioration des connaissances sur le comportement des essences précieuses en fonction des stations dans ce type de sylviculture. Les placettes permanentes peuvent aussi y contribuer.

Cette sylviculture permet certainement d'évoluer vers un système de gestion en continu. Nous sommes en mesure de le mettre en œuvre.

Jean-Jacques BOUTTEAUX

ONF, agence de Haute-Marne
Responsable de l'UT d'Auberive

Sylviculture des forêts à rôle de protection

Les apports du guide pour les Alpes du nord françaises

Voici enfin un cas très particulier de gestion en futaie irrégulière, adapté aux contraintes des forêts de montagne ayant un rôle prépondérant de protection : avec le guide des sylvicultures de montagne pour les Alpes du nord, on dispose désormais de préconisations sylvicoles pratiques et solidement établies.

Dans le cadre d'un projet européen Interreg III A France-Italie-Suisse, une réflexion approfondie concernant la sylviculture de montagne a été menée, associant chercheurs du Cemagref de Grenoble et gestionnaires de l'ONF et du CRPF Rhône-Alpes. Cette action phare a permis de concevoir le guide des sylvicultures de montagne (GSM) – Alpes du nord françaises.

Ce guide biogéographique¹ aborde la sylviculture des peuplements forestiers :

- des étages montagnard et sub-alpin des Alpes du nord (départements de Haute-Savoie, Savoie, Isère et Drôme) ;
- à dominante de sapin, épicéa ou hêtre, qu'ils soient mélangés ou non ;
- à fonction de protection physique contre les risques naturels ou à fonction de production ligneuse.

Aborder la diversité des rôles joués par la forêt de montagne

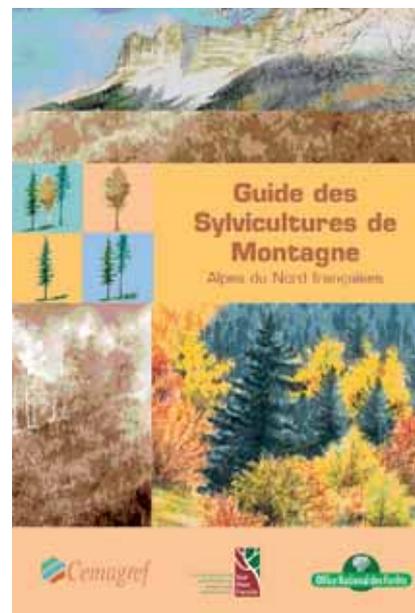
La sylviculture des forêts alpines doit répondre, par le contexte même de cette région, à des attentes variées : récolte de bois résineux de qualité charpente, protection des personnes et des

équipements contre les risques naturels, cadre de vie et de loisirs de pleine nature (ski, randonnée), grands espaces de biodiversité et de naturalité importantes.

Une exigence s'est vite imposée lors de la conception de ce guide des sylvicultures : proposer des sylvicultures diversifiées, adaptées aux principaux enjeux. La première dichotomie retenue, très en amont, distingue les fonctions :

- de production de bois de qualité, principalement charpente résineuse (sapin, épicéa) ;
- de **protection contre les risques** naturels² avérés ou potentiels ; les éléments principaux de cette sylviculture seront développés ici.

Les dimensions biologiques et paysagères ont imprégné ce travail de réflexion, en tant que précautions à respecter par le gestionnaire forestier dans son rôle de production ou de protection. Ainsi, le maintien des habitats forestiers de montagne en bon état de conservation est un objectif constant, clairement affiché : en complément, les sylvicultures spécifiques à objectif de maintien d'espèces naturelles ont été abordées, de façon succincte.



Un document opérationnel, à l'usage du sylviculteur de terrain

La démarche proposée par le guide des sylvicultures de montagne est basée sur une approche pragmatique schématisée figure 1.

Initiée en Suisse en 1997 sous le nom de « soins minimaux aux forêts de protection », cette démarche technique est très structurée. Elle s'est révélée être opérationnelle et appréciée des sylviculteurs de terrain lors de sessions de formation internationales en

¹ Guide établi à l'échelle d'une grande région biogéographique homogène.

² Le rôle de protection implique la présence simultanée sur le terrain d'un aléa (avalanche, chutes de blocs, glissement de terrain, crues torrentielles, érosion) et d'un enjeu humain (habitations, voie de communication fréquentée, infrastructures – école, hôpital, industrie, ligne électrique...)

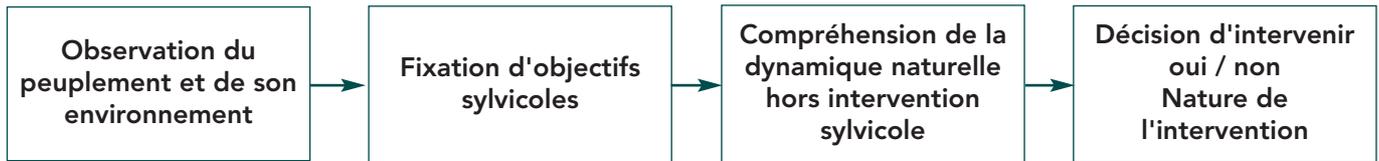


Fig. 1 : démarche globale proposée par le GSM

Suisse, en Italie et en France. Elle a donc été reprise et adaptée aux outils développés dans les Alpes françaises depuis une quinzaine d'années :

- typologie de structures Massif alpin (Renaud *et al.*, 1994 ; Sardin et Gauquelin, 2003) ;
- référentiel de stations forestières Alpes du nord (Joud *et al.*, 2006) ;
- schéma de desserte et exploitabilité en montagne (Descroix, 2005).

Une fiche terrain (figure 2 pages suivantes) permet d'accompagner cette démarche, au cœur même du peuplement. Elle s'utilise préalablement à toute intervention sylvicole en peuplement à rôle de protection, qu'il s'agisse de coupe ou de travaux :

elle remplit un rôle de diagnostic du contexte (nature des risques, stations forestières, difficultés



X. Gauquelin, ONF

Diagnostic en situation de chutes de pierres

d'exploitation) et du peuplement (diagnostic détaillé, orienté vers les indicateurs pertinents en matière de protection) ; elle permet de structurer la prise de décision pour aboutir à la réalisation (ou non) d'une intervention sylvicole.

Cette démarche a un sens pour une entité géographique homogène concernant les aléas (avalanche, chutes de blocs, glissement de terrain, érosion ou crues torrentielles) et le peuplement (homogénéité en terme de structure et de composition).

Des choix techniques forts

Une démarche intégrée

En forêts de montagne, les facteurs et les contraintes influant sur la nature d'une opération sylvicole sont particulièrement nombreux. C'est pourquoi, la démarche globale adoptée repose sur le triptyque « observer/comprendre/décider ».

■ Nécessité de mener des diagnostics pertinents concernant le milieu et le contexte du site (étape 1) : 4 diagnostics ont été jugés nécessaires, au minimum, pour bien aborder cette phase (risques naturels, difficulté d'exploitation³, station forestière, type de structure). L'observation du peuplement est complétée (étape 2) par une description plus détaillée (composition, stratification, capital sur pied, renouvellement, stabilité...). Ces diagnostics sont comparés aux objectifs proposés par le GSM (étape 3) : une innovation consiste à afficher des objectifs minimaux et des objectifs optimaux (voir encadré).

■ Compréhension par le gestionnaire forestier de la dynamique forestière qui, selon toute probabilité, orientera l'évolution naturelle du peuplement (étape 4) ;

■ Choix d'actions efficaces (étape 5) et de scénarios sylvicoles (étape 6) qui respectent autant que possible cette dynamique naturelle, pour que l'intervention soit menée dans le sens des processus biologiques plutôt qu'en sens contraire.

Objectifs minimaux – Objectifs optimaux

Pour une caractéristique de peuplement (prenons l'exemple de la surface terrière G d'un peuplement), il est possible de se fixer 2 niveaux de cibles à atteindre :

- un objectif minimum permettant d'afficher des caractéristiques d'exigence pertinente mais modérée (par exemple G compris entre 15 et 30 m²/ha)
- un objectif optimum permettant d'afficher des caractéristiques d'exigence forte (par exemple G compris entre 20 et 25 m²/ha).

Cette manière de procéder, initiée par la démarche suisse, permet au propriétaire ou au gestionnaire de doser son intervention en fonction des moyens dont il dispose, mais aussi du chemin qu'il reste à parcourir avant d'atteindre une situation très favorable.

³ En fonction de production, le diagnostic « difficulté d'exploitation » est volontairement positionné en amont de la démarche ; en effet, c'est généralement la première question à laquelle le sylviculteur est confronté, celle dont la réponse déterminera la faisabilité ou non de l'intervention en forêt.

Fiche terrain - protection

GSM

1 • Diagnostics (peuplement élémentaire)		
Risques naturels <small>Voir page 32</small> S'il n'existe pas de risque naturel (aïda + enjeu), la forêt ne joue pas de rôle de protection, utiliser la fiche PRODUCTION	Avalanches <input type="checkbox"/> Chutes de blocs <input type="checkbox"/> Glissements de terrain <input type="checkbox"/> Crues torrentielles <input type="checkbox"/> Erosion <input type="checkbox"/>	Zone de départ <input type="checkbox"/> Zone de transit <input type="checkbox"/> Zone de dépôt <input type="checkbox"/> Pente en % ou degré <input type="checkbox"/>
Station forestière <small>Voir page 46</small>	Unité stationnelle <input type="checkbox"/>	
Peuplement forestier <small>Voir page 52</small>	Essencs prépondérantes <input type="checkbox"/>	
	Type de structure <input type="checkbox"/>	Famille <input type="checkbox"/>
Exploitableté <small>Voir page 44</small>	Technique <input type="checkbox"/> D1 <input type="checkbox"/> D2 <input type="checkbox"/> D3 <input type="checkbox"/> D4 <input type="checkbox"/> Economique <input type="checkbox"/> Bénéficiaire <input type="checkbox"/> Déficitaires <input type="checkbox"/>	
Biodiversité et autres fonctions		
Habitats remarquables <small>(voir p. 254)</small>	Espèces remarquables <small>(voir p. 260)</small>	Paysages - équipements d'accueil <small>(voir p. 266)</small>
		Eau (cours d'eau, sources et captages) <small>(voir p. 274)</small>
Statut réglementaire de protection biologique ? <input type="checkbox"/>		
2 • Fiche de recommandations sylvicoles <small>(voir p. 59 à 153)</small>		
Libellé de la fiche retenue <small>(voir p. 46 et 47, colonnes vertes)</small>		Page du GSM : <input type="text"/>
Forêt : <input type="text"/> Parcelle : <input type="text"/>		
Plan + desserte <input type="checkbox"/>		Echelle : <input type="text"/>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> Etape 1 4 diagnostics élémentaires Prise en compte des fonctions biologiques et paysagères </div>		
Il est intéressant de représenter : • le plan du site, avec zones de départ - transit - dépôt • un profil en long (dans le sens de la pente)		
3 • Intervention précédente		
Année : <input type="text"/>	Surface parcourue : <input type="text"/>	
Volume martelé : <input type="text"/>	Chablis exploités : <input type="text"/>	
Observations : <input type="text"/>		
4 • Référence document de gestion		
Surface à parcourir : <input type="text"/>	Nature de coupe : <input type="text"/>	Règles de culture : <input type="text"/>
Rotation : <input type="text"/>	Volume prévu : <input type="text"/>	

Fig. 2 : fiche - terrain PROTECTION

Une intensité sylvicole à limiter

La sylviculture de montagne doit rechercher la minimisation des opérations sylvicoles, toujours coûteuses en milieu montagnard, hétérogène et à forte pente. Comprendre et accompagner la sylvigénèse⁴ permet de limiter les interventions au strict minimum, de manière mieux adaptée au contexte du site. Les risques liés à toute perturbation forte du milieu forestier sont atténués.

Ainsi, la sylviculture proposée privilégie la régénération naturelle et cherche à réduire les travaux sylvicoles

des phases juvéniles (dégauchements, nettoyage-dépessages). Pour les peuplements montagnards mélangés à prépondérance de hêtre, la recherche d'une bille de pied de qualité oriente la sylviculture vers une opération de détournement individuel des tiges, lorsqu'une hauteur élaguée de 6 mètres est atteinte.

Des préconisations claires pour les peuplements à rôle de protection

Pour la première fois en France, des recommandations sylvicoles à

objectif de protection physique ont été mises à disposition des gestionnaires : le concours du Cemagref de Grenoble a été déterminant pour détailler des seuils, des ratios, des caractéristiques précises. De nombreuses connaissances scientifiques, pour beaucoup difficilement accessibles aux sylviculteurs, ont été synthétisées sous une forme aisément utilisable (voir exemples en figure 3 et en encadré).

Le GSM constitue un véritable document technique de référence sur la sylviculture à mener en cas

⁴ Ensemble des phases se succédant dans le temps au cours de l'évolution naturelle de la forêt.

Etape 2
Etat actuel du peuplement

Etape 3
Fixation d'objectifs
- minimum
- optimum

Etape 4
Evolution naturelle

Etape 5
En cas d'évolution naturelle défavorable, actions correctrices possibles

Fiche terrain - protection **GSM**

5 • Analyse détaillée (voir index d'analyse page 15)

Thèmes	État actuel	Objectifs minimum	Objectifs optimum	Evolution naturelle 10 ans - 50 ans	Actions efficaces possibles
Composition en essences en surface terrière <small>(voir page 12)</small>	Essence %	Essence %	Essence %	10 ans 50 ans	
Strates présentes de couvert > 2/10 <small>(voir page 13)</small>	Strate présente : 1 2 3 4 Si peuplement de taillis, dépeçage des strates sans objet	Strates présentes :	Strates présentes :	10 ans 50 ans	
Surface terrière % (GB + TGB) en surface terrière <small>(voir page 14)</small>	Surface terrière % (GB + TGB)	Surface terrière % (GB + TGB)	Surface terrière % (GB + TGB)	10 ans 50 ans	
Renouvellement tiges de franc pied de Ø < 7,5 cm <small>(voir fiche REGÉNÉRATION page 18)</small>	Couvert par essences : Avenir : Contraintes : Microsites favorables : ou/taillis			10 ans 50 ans	
État sanitaire <small>(voir fiche HYGIÈNE page 16)</small>				10 ans 50 ans	
Cibères de stabilité <small>(voir fiche STABILITÉ page 17)</small>	HD : hauteur < 85 ; HD feuillus < 80 Long : troupeau hauteur > 20 ; feuillus > 15 Absence autres perches, croûtes Taillis végétation	ou/taillis ou/taillis ou/taillis		10 ans 50 ans	
Si risque avalanches <small>(voir fiche AVALANCHES page 20)</small>	Couvert inventarié toutes strates confondues 0-20% 20-30% 30-40% 40-50% 50-60% 60-70% 70-80% 80-90% 90-100%			10 ans 50 ans	
Si risque chutes de blocs <small>(voir fiche CHUTES BLOCS page 19)</small>	Trouées dans la pente > 1,5 x haut, abrupt Hauteur peuplement > 2 x hauteur neige Densité de tiges (diamètre 20 et + dans corde de r = 10 m) 0-250 250-350 350-450 450-550 550-650 650-750 750-850 850-950 950-1050 Taillis : trouées > 20 m dans la pente Futaie : trouées > 40 m dans la pente	ou/taillis ou/taillis ou/taillis		10 ans 50 ans	

État très défavorable État minimum État optimum

6 • Bilan

Intervention proposée : **Etape 6**
Modalités d'intervention
(éventuellement, non intervention)

Urgence	Coût estimé	Indicateurs de réussite	fait le (date) :
0 - 5 ans	Coûts		
5 - 10 ans			par (nom du rédacteur) :
plus de 10 ans	Coût total		
Périodicité estimée :		Échéance :	

(cas des peuplements à rôle de protection)

de risques naturels : la démarche menée par le sylviculteur est structurée dans une approche globale, techniquement sécurisée et justifiable vis-à-vis du propriétaire, du maître d'ouvrage ou du financeur.

Une sylviculture de protection par bouquets imposée par les contraintes d'exploitation...

D'une manière générale, l'exploitabilité des peuplements est fortement déterminante dans le choix de la sylviculture à mettre en place : en effet, en situation de forte pente, bûcheron et débardeur travaillent en conditions diffi-

ciles, parfois dangereuses ; leur mobilité est réduite et l'organisation du chantier est fortement orientée par la pente. Il est donc important de marteler les bois avec le souci de limiter la pénibilité de leur travail et le risque, souvent élevé (très pénalisant aussi bien pour les forêts de production que de protection), de générer des dommages au peuplement (dégâts sur la régénération, nombreuses blessures aux arbres restant sur pied).

Une sylviculture par bouquets s'impose donc lorsque la parcelle

devient inaccessible au tracteur, ce qui est souvent le cas en forêt de protection : contrairement aux pratiques habituelles pied à pied, elle permet un travail concentré avec des dégâts d'abattage et de débusquage limités, que la sortie des bois soit réalisée par treuillage au tracteur, au câble-mât court ou au câble long. Les techniques habituelles de martelage sont donc réorientées vers l'ouverture de bouquets de 5 à 25 ares, suivant les contextes stationnels et conformément aux préconisations spécifiques. Le martelage d'éclaircie, dans le peuplement interstitiel

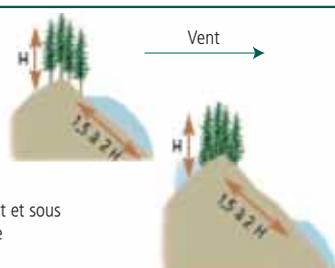
Zone de départ	Limiter la proportion de feuillus et Mélèze à 30 %								
	Favoriser les arbres stables	Résineux : H/D ≤ 65 Feuillus : H/D ≤ 80							
	Favoriser les peuplements jusqu'en limite de crête. En fonction de la perméabilité de la lisière le dépôt se fera soit :	<p>Lisière perméable : sous le vent ≤ 2 H après la lisière</p>  <p>Lisière imperméable : au vent et sous le vent ≤ 2 H après la lisière</p>							
	Maintenir un manteau forestier continu : cas des forêts d'Épicéa, de Sapin et de Pin	<p>Longueur de trouée dans la ligne de plus grande pente</p> <p>$L \leq 1,5 H$</p> <p>Si $L = 1,5 H$ largeur de trouée $l < 0,75 H$</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pente</th> <th>Couvert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30° (60 %)</td> <td>> 30 %</td> </tr> <tr> <td>35° (70 %)</td> <td>> 50 %</td> </tr> <tr> <td>40° (85 %)</td> <td>> 70 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>Valeur du couvert hivernal en fonction de la pente</p>	Pente	Couvert	30° (60 %)	> 30 %	35° (70 %)	> 50 %	40° (85 %)
Pente	Couvert								
30° (60 %)	> 30 %								
35° (70 %)	> 50 %								
40° (85 %)	> 70 %								

Fig. 3 : cas de préconisations en situation de risque de départ d'avalanche (GSM page 203)

La conduite traditionnelle des peuplements irréguliers de montagne par récolte de bois de manière diffuse (généralement pied à pied) ne peut être maintenue qu'en hêtraie-sapinière facilement accessible au tracteur. L'exploitation et la sortie des bois peuvent alors être réalisées avec précaution, en limitant les dommages à la régénération et aux meilleurs arbres d'avenir. De plus, dans ces formations forestières, sapin et hêtre se régénèrent sans qu'il soit nécessaire d'apporter une forte lumière au sol par l'ouverture de grandes trouées : le maintien d'un capital sur pied modéré (surface terrière de 20 à 30 m²/ha) permet au renouvellement de s'installer.

Des techniques innovantes

Des travaux sylvicoles d'une nature particulière sont préconisés en situation de protection. On peut citer notamment :

- la mise en œuvre d'une sylviculture par collectifs⁵ dans le cas du risque de départ d'avalanche ; cette technique mise au point en Suisse est particulièrement efficace pour fixer le manteau neigeux au sol (Fay et al., 2003) ;
- l'abattage d'arbres en oblique dans la pente pour freiner la chute

séparant les bouquets récoltés, doit être alors abandonné : les inconvénients sylvicoles sont limités car l'hétérogénéité stationnelle en montagne induit une hétérogénéité des structures de peuplement.

... avec des avantages sylvicoles

Parallèlement, le martelage par trouées présente des avantages sylvicoles en forêts de montagne. En effet, pour une essence comme l'épicéa, l'installation de semis au sol exige une quantité de chaleur et de lumière minimum : à l'étage subalpin (généralement d'altitude supérieure à 1 500 m), les travaux scientifiques suisses (Brang, Ott et Schönenberger, 1998) ont montré que 2 heures de soleil sont nécessaires pour permettre à la régénération de naître. Seule l'ouverture de trouées d'environ 5 à 25 ares (suivant pente et exposition) permettra que cette exigence micro-climatique soit satisfaite.

De plus, la jeunesse acquise au sein des trouées est de facto mise hors risque de destruction lors des exploitations ultérieures, notamment sur fortes pentes (abattage orienté par la seule direction de plus grande pente).

Préconisations pour le cas des chutes de blocs

Les peuplements forestiers à rôle de protection contre les chutes de pierres et de blocs doivent être traités avec quelques idées maîtresses :

- favoriser les feuillus, plus résistants aux chocs que les résineux ;
- obtenir un nombre de tiges élevé (pour maximiser le nombre d'obstacles), mais dans un contexte de surface terrière globale modérée (pour permettre à la dynamique de régénération de s'exprimer) ;
- limiter le taux de gros bois, fortement consommateurs d'espace, dont le couvert va nuire aux perches et petits bois avoisinants ; la présence de gros arbres a pour conséquence de faire chuter la densité locale et parallèlement la capacité du peuplement à freiner et stopper les blocs rocheux ;
- ne pas créer de trouées de plus de 40 m de longueur dans le sens de la pente en futaie (20 m dans le cas du taillis) ; au-delà, un bloc rocheux est susceptible de reprendre une énergie maximale à l'aval de l'ouverture, anéantissant les actions de freinage réalisées par le peuplement situé en amont ;
- abattre en oblique dans la pente certains arbres et les laisser en place (rôle d'atténuation de l'énergie des pierres en mouvement).

⁵ Un collectif (Zeller, 1993) est un ensemble d'arbres, d'une dizaine d'ares maximum, aux houppiers imbriqués et dont les arbres périphériques à branches très développées forment une lisière distincte, l'individualisant du reste du peuplement.



Trouée de 15 ares

de blocs rocheux et pour limiter la reptation de la neige dont l'action peut conduire à l'arrachage de semis et à la formation de crosses à la base des troncs des arbres (entraînant une moindre stabilité des tiges).

Une large diffusion auprès des sylviculteurs des forêts publiques et privées

Le GSM a été diffusé à partir de l'automne 2006 auprès d'un large public de gestionnaires forestiers, mais aussi de chercheurs. Pour ce qui concerne la diffusion interne à l'ONF en Rhône-Alpes, plus de 30 journées de présentation ont été organisées pour permettre une « prise en main » du document et surtout une appropriation de la démarche de terrain qu'il propose.

Xavier GAUQUELIN
ONF, DT Rhône-Alpes

Benoît COURBAUD
Cemagref
Groupement de Grenoble

Jacques FAY
ONF, DT Rhône-Alpes

Frédéric BERGER
Cemagref
Groupement de Grenoble

Bibliographie

BRANG P., OTT E., SCHÖNENBERGER W., 1998. La forêt de montagne en Suisse : écologie, sylviculture, aménagement. Revue Forestière Française, vol. 50, n°3, pp. 97-115

DESCROIX L., 2005. Référentiel pour la réalisation de schémas de desserte en forêts de montagne. ONF document interne. 7 p.



Sylviculture par collectifs

FAY J., WASZAK D., MERMIN E., 2003. La sylviculture par collectifs. Rendez-vous techniques, n° 2, pp. 29-31

GAUQUELIN X., COURBAUD B., 2007. Guide des sylvicultures de montagne : Alpes du Nord Françaises. Cemagref, ONF, CRPF Rhône-Alpes. 278 p.

JOUD et al., 2006. Synthèse des stations forestières pour les Alpes du nord et les montagnes de l'Ain. CRPF, IFN, ONF, IDF.

RENAUD J.P., RUPE C., CHAUVIN C., MERMIN E., LECLERC D., FAY J., 1994. Les forêts résineuses à fonction de protection dans les Alpes du nord françaises. Document Cemagref – ONF. 125 p.

SARDIN T., GAUQUELIN X., 2003. Les typologies de peuplements des forêts de montagne. Evolutions récentes dans les Alpes et les Pyrénées. Rendez-vous techniques, n°2, pp. 20-24

ZELLER E., 1993. Traitement des collectifs. Projet « Sylviculture en montagne II ». Rapport 3A du groupe de travail. Maienfeld (Suisse) : école intercantonale des gardes forestiers. 49 p.

X. Gauquelin, ONF

J. Fay, ONF

Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés

1 — Impact des amendements basiques sur les sols et leur environnement

L'amendement des sols forestiers dégradés est un sujet relativement méconnu des gestionnaires, et pourtant crucial dans certaines régions. Pour pallier cette carence, Alain Brêthes fait le point : voyons d'abord les principes de fonctionnement, les impacts et les limites de l'amendement ; un deuxième article traitera des questions pratiques.

Les pollutions atmosphériques acidifiantes, comme les dépôts de soufre et d'azote, la surexploitation des bois telle que pratiquée au cours des 18 et 19^e siècles mais aussi jusqu'après la dernière guerre, etc. ont comme conséquence majeure une diminution de la fertilité minérale et une acidification des sols conduisant à placer certaines forêts en situation de fragilité. Cet appauvrissement peut entraîner des dépérissements de peuplements ou une réduction des capacités des arbres à surmonter les stress liés aux changements climatiques.

Les perspectives de restauration de tels sols acides reposent essentiellement sur l'utilisation d'amendements basiques. La majorité des expérimentations en forêt montre le grand intérêt de ces apports pour redresser le niveau de fertilité minérale des sols, dynamiser l'activité biologique et améliorer la nutrition et l'état sanitaire des peuplements.

La restauration des sols acides est donc bien une réalité, mais l'amélioration n'est pas identique pour tous les sols forestiers. En particulier, son intensité et sa

1 - Ne pas confondre fertilisation et amendement

L'apport d'engrais et l'amendement, regroupés sous le terme général de fertilisation, sont deux modes d'amélioration des sols à ne pas confondre. Chacun a un rôle différent et les produits, quantités et fréquences des apports n'ont rien de comparable.

L'apport d'engrais a pour but essentiel de maintenir ou d'accroître la richesse minérale d'un sol, notamment en azote, phosphore et potassium afin de fournir directement à la plante les éléments assimilables dont elle a besoin. Les produits utilisés sont très solubles pour un effet immédiat. Ces apports sont renouvelés à pas défini pour assurer la disponibilité des éléments au rythme des prélèvements par la plante.

L'amendement a pour rôle d'améliorer les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol. Deux types d'amendement sont possibles : l'amendement organique et l'amendement basique. En agriculture, on cherche à améliorer la stabilité structurale du sol d'où un apport d'amendement organique en plus de l'amendement basique lorsque cela est nécessaire. Par contre, en forêt, on vise à favoriser l'activité biologique des sols et donc le cycle biologique des nutriments. L'amendement porte essentiellement sur le calcium, le magnésium et secondairement sur le potassium et le phosphore. L'effet sur la plante est indirect. Les produits sont peu solubles, pour une action lente et en profondeur. En général, l'amendement n'est apporté qu'une seule fois, du moins au cours d'un cycle sylvicole.

rapidité de développement dépendent beaucoup des caractéristiques initiales des sols.

Ce sujet de l'amendement est traité en deux étapes. Il s'agit tout d'abord de faire ici le point sur les résultats obtenus suite à

des apports d'amendement en forêt et d'en analyser les avantages et les limites. Dans un deuxième article, nous proposons une démarche de diagnostic des sites à amender et de calcul des apports. Entre les apports massifs admis outre-Rhin et la pratique

très marginale de l'amendement à l'ONF, il y a certainement un juste milieu à trouver.

Soulignons d'entrée qu'il n'est aucunement question de transformer les sols acides en sols riches. Par ailleurs une attention spéciale doit être portée aux milieux d'intérêt écologique particulier afin de ne pas amender des sites sensibles. Le principe de l'amendement devrait enfin faire l'objet d'une concertation avec les partenaires de la gestion forestière.

Réactiver le fonctionnement biologique des sols

Nota : Les termes pédologiques sont expliqués en encadré 2.

Le fonctionnement biologique des sols repose sur :

- les acteurs de la transformation des matières organiques : décomposeurs primaires comme les diplopodes, isopodes, larves de diptères et vers épigés, ou secondaires comme les collemboles, acariens oribates, enchytréides ;
- les acteurs de leur incorporation au sol : animaux fouisseurs comme les vers endogés et anéciques ;
- la structuration du sol.

Par apport d'un amendement, on espère améliorer les caractéristiques d'un sol donné et induire une évolution de la faune du sol permettant un fonctionnement de type mull au lieu de celui qui caractérise les humus de forme moder ou mor typiques des sols très acides.

Évolution d'un sol amendé

Effet sur la végétation

Le groupement floristique d'une station est le reflet de l'ensemble des caractères du milieu qu'ils soient liés au sol ou au climat. C'est donc un élément diagnostic de la qualité du sol qui peut être

2 - Quelques éléments de pédologie

Les formes d'humus

En climat tempéré et en milieu aéré, on distingue quatre formes principales d'humus forestier : le mull, le moder, le mor et l'amphimus.

Le *mull* se caractérise par une bonne activité de vers de terre créant un horizon A à structure grumeleuse. Selon l'état de transformation des horizons O, on distingue l'eumull (horizon OL seul, discontinu), le mésomull (horizon OL quasi continu), l'oligomull (horizon OL continu et OF discontinu) et le dysmull (horizons OL et OF continus).

Dans le *moder*, l'activité des vers de terre endogés et anéciques est pratiquement inexistante. L'horizon A perd sa structure grumeleuse, il y a juxtaposition de grains de sable propre et de grains de matière organique très noirs. La matière organique fine des horizons OF et OH correspond majoritairement à des boulettes fécales de la faune des litières donnant à ces matières organiques une structure granulaire (grains plus ou moins arrondis de taille variable, bien reconnaissables à la loupe de terrain). Dans l'hémimoder, existent seuls les horizons OL et OF, dans l'eumoder (ou moder) les horizons OL, OF et OH, ce dernier ne dépassant pas 1 cm d'épaisseur, et dans le dysmoder l'horizon OH a plus de 1 cm d'épaisseur.

Le *mor* voit l'activité de la faune se réduire à sa plus simple expression, seuls subsistent quelques enchytréides. La transformation des matières organiques étant alors assurée principalement par les champignons. L'horizon OH, souvent épais, perd sa structure granulaire et devient massif ou pulvérulent. L'horizon A au sens de l'incorporation de matière organique au sol minéral par la faune du sol n'existe plus. Par contre il peut y avoir un horizon (type Eh par exemple) coloré par des matières organiques mais qui correspond à une migration "chimique" des acides organiques.

L'*amphimus* constitue une forme d'humus bien particulière et relativement rare en plaine sous climat tempéré. Il combine un horizon OH de type moder et un horizon A plus ou moins nettement grumeleux de type mull. Cette forme d'humus se développe dans des conditions particulières de climat (en particulier au montagnard) ou sous des peuplements résineux mais à sol riche.

Le taux de saturation (S/T) correspond à la proportion d'éléments nutritifs (en général calcium, magnésium et potassium, nommés souvent "cations basiques") dans le sol par rapport à la totalité de ce que le sol peut fixer (sa capacité d'échange cationique CEC ou T). Les places non occupées par les cations "basiques" le sont par l'aluminium, les protons et le manganèse (cations dits "acides").

Le pH mesure le caractère acide du sol. Il est déterminé par la concentration en protons que l'on obtient en mélange un volume de sol à 2,5 volume d'eau distillée (pH_{eau}) ou d'une solution normale de chlorure de potassium (pH_{KC}). Les sols sont considérés comme acides quand le pH_{eau} est inférieur à 4,5, peu acides à neutres entre 4,5 et 7,5, basiques au delà de pH 7,5.

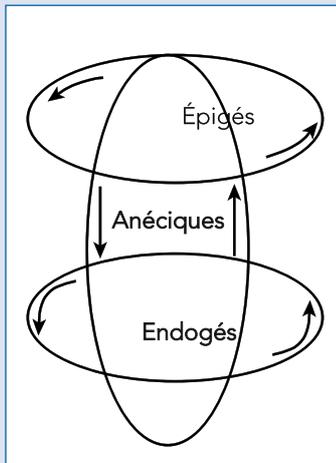
Le rapport carbone / azote (C/N) indique le degré d'humification des matières organiques du sol. Plus il est bas, meilleure est la minéralisation de ces matières organiques donc plus grande est l'activité biologique des bactéries. Les humus de forme mull ont souvent un rapport C/N inférieur à 20 et les formes mor un rapport C/N supérieur à 25.

valablement utilisé pour suivre l'évolution de la fertilité après amendement.

Dans la plupart des expérimentations on voit apparaître, après

apport d'amendement basique, des espèces neutroclines, neutrophiles et neutro-nitrophiles comme le framboisier, le sureau, la digitale pourpre, l'épilobe en épis, l'ortie, le fraisier, la laitue des

3 – Vers épigés, anéciques et endogés



Les vers épigés - Vivent essentiellement dans la litière. Ne consomment que de la matière organique d'où une accumulation de déjections holorganiques dans les horizons O. Ne participent pas à l'enfouissement des matières organiques et très peu à la structuration des horizons organo-minéraux. Quelques espèces caractéristiques : *Eisenia* spp., *Dendrobaena octaedra*, *D. rubida*, *Lumbricus rubellus*, *L. castaneus*.

Les vers anéciques - Vivent dans le sol minéral et se nourrissent de la matière organique fraîche des horizons O. Rôle important dans la fragmentation des litières, dans le brassage et le mélange matière organique – matière minérale, dans la structuration des horizons organo-minéraux et dans le développement de complexes argilo-humiques. Espèce emblématique : *Lumbricus terrestris*.

Les vers endogés - Vivent dans le sol minéral et se nourrissent de la matière organique existant dans les horizons organo-minéraux (M.O. enfouie, racines mortes, etc.). Rôle dans le brassage et le mélange matière organique – matière minérale, dans la structuration des horizons organo-minéraux et dans le développement de complexes argilo-humiques. Quelques espèces caractéristiques : *Allolobophora icterica*, *A. caliginosa*, *A. rosea*, *A. limicola*, *Octolasion cyaneum*.

des vers de terre (Gaspar *et al.*, 1982, Deleporte et Tillier, 1999). Toutefois, dans le cas des vers, il ne s'agit le plus souvent que de vers épigés (vers des litières).

Les changements ne portent que sur des espèces déjà existantes dans le sol, ce qui est souvent le cas pour les espèces des litières comme les microarthropodes, les enchytréides ou les vers épigés, mais plus exceptionnel pour les vers anéciques et endogés (voir encadré 3). En leur absence, les améliorations ne seront que temporaires, le fonctionnement du sol n'étant pas fondamentalement modifié. Car les vers anéciques et endogés, animaux fouisseurs, ont un rôle important dans le fonctionnement et les propriétés du sol : en plus de la fragmentation des litières et de la transformation des matières organiques, ils assurent la structuration, l'aération et, par brassage du sol minéral et de la matière organique, le développement de complexes argilo-humiques dont le rôle est important dans la stabilisation des améliorations.

Diverses études ont révélé l'intérêt mais aussi les difficultés que peuvent avoir les introductions de vers de terre (Baete *et al.* 2004). Il a été montré, en particulier, que si les vers introduits pouvaient se multiplier, ils restaient cantonnés aux sites amendés et ne colonisaient pas le voisinage.

Effet sur le fonctionnement des humus

La forme d'humus est à la fois le reflet du fonctionnement biologique d'un sol et un des moteurs de l'évolution pédogénétique. Toute intervention entraînant sa modification aura donc des incidences en chaîne sur l'ensemble de l'écosystème local (Ponge 2003).

L'amélioration de l'activité biologique favorise la minéralisation

murailles ou la scrofulaire noueuse ; ces nouvelles espèces sont parfois nombreuses mais chacune d'elles n'est souvent représentée que par quelques pieds dispersés. Elles témoignent d'un changement dans le niveau de fertilité des sols (richesse minérale) ou dans leur activité biologique, et d'une diminution de leur acidité (pH). Ces changements sont bien mis en évidence par l'application des valeurs indicatrices d'Ellenberg ou des coefficients de Gégout *et al.* (2002) : les premières montrent une augmentation des valeurs liées à l'azote et de l'indice d'acidité lié à l'élévation du pH, les seconds sont relatifs au pH, au rapport carbone/azote (C/N) et au taux de saturation (S/T).

Corrélativement, les espèces acidiphiles caractéristiques des milieux concernés régressent sensiblement mais ne disparaissent pas : le groupement floristique initial n'est

pas fondamentalement modifié. Renaud (2001) souligne d'ailleurs, dans son rapport sur les expériences conduites dans l'Est de la France, que l'enrichissement en espèces semble atteindre un maximum en une dizaine d'années après l'apport mais qu'ensuite, progressivement, la composition du cortège végétal se rapproche de ce qu'elle était à l'origine tout en conservant certaines espèces caractéristiques des nouvelles propriétés du milieu.

Effet sur la faune des humus

Les nombreuses études sur la faune des sols amendés montrent une diminution des espèces caractéristiques des moders comme certains enchytréides (Huhta *et al.*, 1983) et, inversement, le développement de groupes caractéristiques des mulls, que ce soient des macro-arthropodes (Geoffroy et Molfetas, 1983), des micro-arthropodes (Arpin *et al.*, 2004) ou

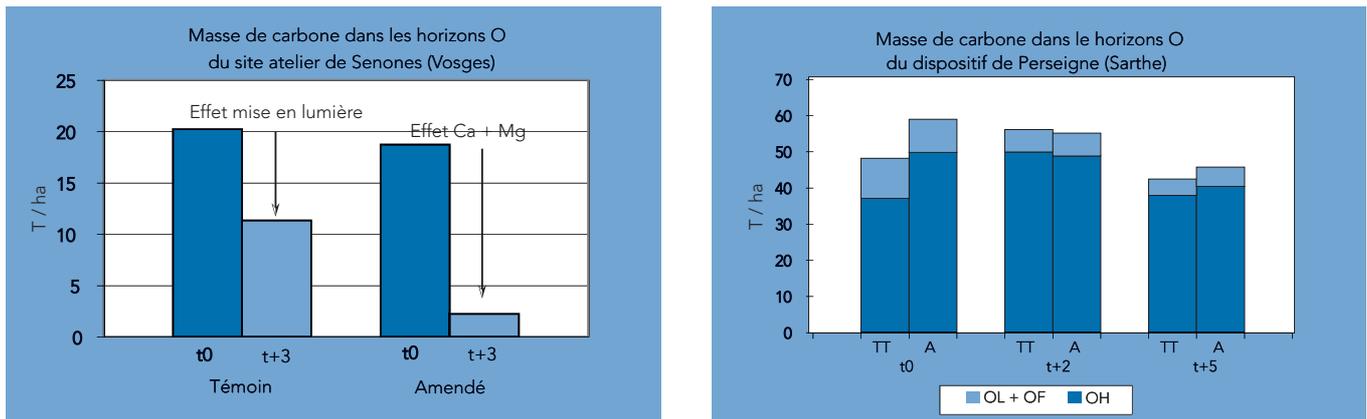


Fig. 1 : évolution comparée de la masse des horizons O (mesurée par les stocks de carbone) dans deux sites expérimentaux

Dans l'Est, où les horizons O sont moins développés, l'effet de l'amendement est net et s'ajoute à l'effet éclaircissement visible sur le témoin (coupe) ; dans l'Ouest, où la matière organique est très abondante, pas d'évolution en 5 ans entre le témoin TT et la modalité amendée A.

des matières organiques avec réintroduction des éléments nutritifs dans le cycle biologique et une diminution de l'acidité des sols concourant à une meilleure nutrition des arbres et, souvent, une amélioration de leur état sanitaire. Cette amélioration est d'autant plus intéressante qu'elle est susceptible de se pérenniser par auto-entretien, tant qu'une nouvelle perturbation ne vient pas mettre en cause l'équilibre obtenu. Encore faut-il que l'état initial du sol permette d'atteindre cet équilibre.

Les expériences conduites en Lorraine et dans les Ardennes se sont traduites, en une dizaine d'années, par une nette diminution des épaisseurs des horizons OF + OH (figure 1) et la transformation d'humus de forme moder en humus de formes oligomull et dysmull (Toutain *et al.* 1988, Renaud 2001) avec développement des champignons de pourriture blanche et d'une nette activité de vers de terre (nombreux turricules de vers anéciques et structure grumelleuse des horizons A). Ces modifications semblent relativement stables dans le temps, du moins sur la durée des observations, soit plus de 10 ans.

Par contre, les expériences menées dans les forêts de la

Sarthe et de l'Orne (Brêthes 2004, 2005) ne montrent, cinq ans après amendements (2002 et 2003), aucun changement notable dans la morphologie des humus (dysmoder et mor) ou dans la masse des horizons OH (figure 1). L'explication vient de ce que les moders réactivés dans l'Est avaient des horizons OH qui ne dépassaient guère 10 mm d'épaisseur alors que dans les sites de l'Ouest l'épaisseur est en moyenne de l'ordre de 50 mm mais peut dépasser 70 et même 100 mm. L'activité biologique de ces sols est donc nettement plus réduite et la dynamisation ne peut être que plus lente, si elle est possible. Toutefois, l'évolution du milieu forestier demande souvent plus d'une dizaine d'années ; il est donc logique que les modifications à cinq ans soient très ténues. L'interprétation sera certainement plus convaincante suite aux analyses et descriptions 10 ans après amendement (2007 et 2008).

D'une manière générale, il est fort probable que, cette restauration soit plus facile sous peuplements feuillus que sous résineux, en raison de la nature même des litières. Mais ceci reste encore à démontrer et à quantifier.

Effet sur le bilan minéral du sol

Un autre aspect, et non des moindres, concerne l'amélioration des propriétés chimiques des sols amendés. Les valeurs du pH, à la fois pH_{eau} et pH_{KCl} , augmentent dans des proportions qui dépendent de la composition de l'amendement et tout particulièrement des anions apportés. En moyenne, ces gains sont de l'ordre de 0,5 à 1 unité pH pour le pH_{eau} .

L'apport d'amendement a un effet significatif sur les concentrations en cations échangeables : augmentation des teneurs en calcium et magnésium, diminution des teneurs en aluminium et en protons. Il en résulte une nette élévation du taux de saturation du complexe adsorbant. L'effet sur le phosphore et surtout sur le potassium dépend de la composition de l'amendement. Dans de nombreuses expériences réalisées dans l'Est de la France, seuls ont été apportés le calcium et le magnésium, qui se sont substitués au potassium sur le complexe d'échange : il s'ensuit une diminution des concentrations en potassium. Dans les expériences conduites dans l'Ouest, l'apport de potassium associé au calcium, magnésium et phosphore, a per-

mis de stabiliser les concentrations et de freiner les pertes. Un apport équilibré en ces divers éléments est donc nécessaire pour éviter de créer des carences par élimination des éléments les plus instables.

Exprimés en stocks d'éléments disponibles, les gains sont relativement importants, les apports pouvant être largement supérieurs aux stocks initiaux. Ainsi dans les dispositifs de l'Ouest, ils représentent entre 1,5 et 2,8 fois le stock initial de calcium, entre 1/3 et 2/3 du stock initial de magnésium et moins de 10 % du stock initial de potassium. Après 5 ans, une grande part de l'amendement en calcium, en magnésium et en phosphore reste stockée dans le sol. De son côté, Nys (2006) indique que, dans les Vosges, dix ans après l'amendement, il reste dans les sols plus de 70 % des apports en calcium et en magnésium.

Ainsi, on constate que l'effet amendement sur la fertilité minérale est relativement durable. Ce qui justifie de ne programmer l'apport qu'une seule fois durant la révolution sylvicole (voir encadré 1).

Autres retombées

Améliorer la qualité des eaux

Outre les effets sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, l'acidification des sols affecte fortement la qualité physico-chimique des cours d'eau et les communautés animales qui y vivent. Cette acidification des eaux peut avoir également des conséquences graves sur la santé humaine.

Les études relatives aux effets des amendements sont en général limitées à la parcelle forestière. Très peu de cas ont concerné l'ensemble d'un bassin-

versant incluant le cours d'eau. Deux sites ateliers viennent d'être installés dans deux bassins versants des Vosges, l'un sur granite acide l'autre sur grès siliceux. Ce projet poursuit plusieurs objectifs dont en particulier l'évaluation de l'amplitude et de la vitesse de l'amélioration de la qualité chimique et biologique des cours d'eau après amendement à l'échelle du bassin-versant (épandage par hélicoptère à l'automne 2003) et le test en vraie grandeur de l'efficacité de ce type d'amendement sur les sols, la flore terrestre et les eaux. Sont étudiées également les modifications de la faune et de la flore aquatiques.

Les résultats obtenus à la fin des deux premières années montrent des réponses très différentes entre les deux bassins. L'amélioration de la qualité des eaux du bassin granitique est sensible, avec augmentation nette des concentrations en calcium, magnésium et potassium (Angéli, 2006). Ceci serait lié à un temps de résidence des éléments apportés plus court sur granite en raison de l'existence d'une couche indurée en subsurface favorisant les écoulements latéraux. Par contre sur grès, les arènes profondes et poreuses stockent ces éléments et retardent ainsi leur mise à disposition dans les eaux de drainage. Aucune amélioration notable de la qualité des eaux n'y a été notée à la fin de cette première période.

Lutter contre le dépérissement des forêts

L'intérêt des amendements calcico-magnésiens a été remis à l'ordre du jour dans les années 80 pour faire face aux dépérissements forestiers. Deux types de symptômes avaient été distingués : la perte prématurée d'une partie du feuillage (éclaircissement des

houppiers) et le jaunissement des feuilles et des aiguilles correspondant le plus souvent à une carence magnésienne.

De nombreuses études ont montré l'effet positif des amendements calciques pour l'amélioration des feuillages (Bonneau et al., 1994). Celle-ci porte tout autant sur la diminution de la défoliation que sur la réduction du jaunissement. Ces travaux montrent également que cette amélioration passe par une meilleure survie des jeunes racines et le développement de leur micro-rhization.

Dans le même ordre d'idée, la conservation ou la restauration d'une fertilité minérale correcte permet à de nombreuses essences de surmonter les crises climatiques : excès d'eau à certaines saisons, sécheresse, froid intense en hiver, etc.

Un bilan positif

Toutes les expériences sur l'amendement en forêt montrent des changements relativement rapides dans les stocks d'éléments nutritifs disponibles et dans les communautés fauniques du sol, s'exprimant dans la composition du cortège végétal, et un maintien de ces modifications sur le moyen terme.

Il en va tout autrement des modifications du fonctionnement biologique du sol. Le laps de temps nécessaire à cette évolution est de l'ordre minimum de la dizaine d'années. Ce délai dépend beaucoup de l'état initial de l'écosystème. Il sera relativement court pour les sols à humus de forme moder à horizon OH peu épais, car ces sols n'ont pas perdu leur potentiel de réactivation et il existe encore une faune favorable au développement d'une activité de mull. Par contre dans les sols à



ONF Le Mans

Humus d'un sol dégradé (sous feuillus), en FD de Perseigne (72), parcelle 227



ONF Le Mans

Peuplement sur sol dégradé en FD de Perseigne, parcelle 278

horizon OH épais (formes dysmoder et mor), ces délais seront beaucoup plus longs et, surtout, il est à craindre que, en l'absence d'animaux fouisseurs capables de stabiliser la nouvelle activité biologique, on revienne progressivement à l'état initial une fois passé l'effet immédiat des apports.

Tous les sols ne sont donc pas à mettre sur le même plan. Certains ne justifient aucunement d'être amendés en raison soit de leur richesse minérale initiale soit de contraintes particulières comme les sols engorgés. Pour d'autres, l'amendement est *a priori* inutile car leur pauvreté chimique est telle que l'on ne peut envisager une amélioration durable. Reste qu'une grande majorité des sols acides, très fréquents en forêt, peuvent justifier une telle pratique. Rappelons, si cela était nécessaire, qu'il ne s'agit aucunement de transformer par apport d'amendement ces sols acides en sols riches, d'ailleurs les apports, toujours limités, ne le permettent pas. On

cherche non pas à changer la nature de ces stations mais à leur redonner un fonctionnement plus proche de la moyenne des sols à acidité réduite.

Pour ce faire, il faut identifier correctement les diverses situations et proposer un mode opératoire de décision et de réalisation. C'est l'objet du deuxième article.

Alain BRÊTHES

ONF, DT Centre-Ouest
Direction Forêt
alain.brethes@onf.fr

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé à réaliser cette synthèse des études sur les amendements basiques en forêt et plus particulièrement C. Nys de l'INRA-Nancy et J.F. Ponge du Muséum National d'Histoire Naturelle pour la mise au point de cet article.

Bibliographie

ANGELI N., 2006. Évolution de la composition chimique des ruisseaux vosgiens : analyse rétrospective et effet d'un amendement calco-magnésien. Thèse de Université Henri Poincaré, Nancy. 458 p.

ARPIN P., BETSCH J.M., GEOFFROY J.-J., 2004. Principaux résultats sur l'ensemble des campagnes d'échantillonnage 1999-2004. Convention "Amendements calciques", suivi de la faune du sol, PNR Normandie-Maine et Muséum National d'Histoire Naturelle. Rapport d'études. 151 p.

BAETE H., THYS S., DE VOS B., MUYS B., 2004. Effects of tree species, fertilizer application and earthworm introduction on earthworm community composition in an ancient forest on acidified loess soil in central Belgium. Abstracts of XIVth International Colloquium on Soil Zoology and Ecology, Rouen, 30/08-03/09 2004. Poster contribution.

BONNEAU M., LANDMANN G., GARBAYE J., RANGER J., NYS C., 1994. Gestion et restauration de la fertilité minérale des sols. *Revue Forestière Française*, vol. 46, n° 5, pp. 579-585

BRETHES A., 2004. Amendements calciques : restauration des écosystèmes dégradés dans les forêts du Parc Naturel Régional Normandie-Maine. Dispositifs de Perseigne et de Sillé-le-Guillaume (Sarthe) : résultats des relevés et analyses réalisées en 2002. Document ONF et PNR Normandie-Maine, 172 p.

BRETHES A., 2005. Amendements calciques : restauration des écosystèmes dégradés dans les forêts du Parc Naturel Régional Normandie-Maine. Dispositifs d'Écouves et des Andaines (Orne) : résultats des relevés et analyses réalisées en 2003. Document ONF et PNR Normandie-Maine, 190 p.

DELEPORTE S., TILLIER P., 1999. Long-term effects of mineral amendments on soil fauna and humus in an acid beech forest floor. *Forest Ecology and Management*, 118, pp. 245-252

GASPAR Ch., BOUCHE M., LAURENT G., WONVILLE Ch., 1982. Recherches sur l'écosystème forêt : effet d'une fertilisation en forêt sur les populations de lombrics. *Annales de la Société Royale Zoologique de Belgique*, vol. 112, n° 1, pp. 45-48

GEGOUT J.C., COUDUN C., BRISSE H., BERGES L., 2002. Comportement écologique des espèces forestières vis-à-vis du climat et du sol en France. Application à l'évaluation des charges critiques d'acidité et d'azote. Rapport final de la convention ADEME/ENGREF n° 99 62 003. LERFOB, ENGREF-Nancy. 51 p.

GEOFFROY J.J., MOLFETAS S., 1983. Effets de l'enrichissement des sols forestiers en éléments majeurs sur la structure fonctionnelle des peuplements de macroarthropodes. In : Ph Lebrun et al. (eds.), *New Trends in Soil Biology, Proceedings of VII International Colloquium of Soil Zoology*, Louvain-la-Neuve, August 30 — September 2, 1982, Dieu-Brichart, Ottignies-Louvain-la-Neuve, pp. 603-605.

HUHTA V., HYVONEN R., KOSKENNIEMI A., VILKAMAA P., 1983. Role of pH in the effect of fertilization on nematoda, oligochaeta and microarthropods. In : Ph Lebrun et al. (eds.), *New Trends in Soil Biology, Proceedings of VII International Colloquium of Soil Zoology*, Louvain-la-Neuve, August 30 — September 2, 1982, Dieu-Brichart, Ottignies-Louvain-la-Neuve, pp. 61-73

NYS C., 2006. Les remèdes existants : La restauration des sols acides par l'amendement calco-magnésien : une technique au point, mal relayée par les organismes professionnels et trop peu répandue. *La Forêt Privée*, n°289, pp. 33-40

PICARD J.F., BECKER M., LEBOURGEOIS F., 1993. Modifications de la flore et de l'humus induites par un apport de calcium dans différents écosystèmes forestiers du Nord-Est de la France. *Forêt et amendements calcaires*, document INRA, pp. 61-73

PONGE J.F., 2003. Humus form in terrestrial ecosystem: a framework to biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 35, n° 7, pp. 935-945

RENAUD J.-P., 2001. Restauration de sols forestiers acides par un amendement calco-magnésien :

cas du Massif vosgien et de l'Ardenne. Rapport d'étude Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - O.N.F. - I.N.R.A. 140 p.

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, n°2, pp. 99-107

Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés

2 — Où, pourquoi et comment amender ?

Dans le précédent article, nous avons vu l'intérêt mais aussi les limites de l'amendement en forêt pour améliorer le fonctionnement et l'évolution des propriétés des sols. Dans cette deuxième partie, l'auteur définit les situations dans lesquelles l'amendement pourra être envisagé et présente une démarche de diagnostic et de calcul des apports.

Rappelons tout d'abord que l'amendement en forêt vise à améliorer le fonctionnement biologique des sols, et donc la santé et la vitalité des peuplements forestiers, sans chercher à modifier radicalement la nature des stations. Cet apport raisonné d'amendement est essentiellement à envisager dans les cas suivants.

À des fins curatives, l'amendement peut être utilisé :

i) pour corriger un appauvrissement des sols dû à une gestion antérieure fortement exportatrice et exacerbé par l'acidification anthropique (pollution). C'est typiquement le cas de nombreux sols des forêts de Basse-Normandie, des Pays-de-Loire, de Bretagne, des Ardennes, des Pyrénées, des Vosges ou du Massif Central. Dans ces régions, l'exploitation répétée de jeunes taillis pour alimenter, entre autres, les forges et verreries aux 18 et 19^e siècles ou la récolte de produits forestiers pour diverses utilisations paysannes a entraîné une acidification puis une dégradation importante des sols,

ii) pour remédier au dépérissement de peuplements fragilisés par un tel appauvrissement des sols.

À des fins préventives, l'amendement peut être envisagé sur les sols acides et pauvres mais dont les peuplements ne montrent pas actuellement de symptômes de dégradation, l'amendement va limiter les effets de la pollution atmosphérique ou de l'acidification naturelle des sols par entraînement des nutriments et par exportation lors des récoltes de bois, même modérées. Il s'agit donc, ici, de ne pas attendre que les problèmes se manifestent pour intervenir. Ce choix doit absolument être dicté par une analyse correcte du milieu et des risques encourus.

Il s'agit là d'une démarche qui doit être parfaitement raisonnée, i) quant aux sols à traiter, car il ne s'agit en aucune manière d'intervenir sur tous les sols naturellement acides, ii) quant aux milieux eux-mêmes car certaines stations très acides correspondent à des habitats particuliers à conserver en tant que tels. L'amendement est à proscrire dans ce cas.

Principes de classement des sols

La résistance d'un sol à l'acidification dépend de sa capacité à neu-

traliser les acides provenant des retombées atmosphériques ("dépôts acides") ou à compenser les exportations. Cette capacité est directement liée à la nature du sol (évolution pédogénétique) et à la composition du matériau parental (altération des minéraux). Ainsi deux groupes de matériaux peuvent être distingués :

- le groupe des matériaux pauvres en éléments nutritifs et en minéraux altérables, sensibles à l'acidification : grès, certains granites et gneiss, alluvions anciennes, formations d'altération anciennes comme les formations à silex, certains schistes et limons, etc. ;
- le groupe des matériaux riches, à pouvoir tampon élevé, comme les marnes, les calcaires, les roches volcaniques récentes, les granites calco-alcalins, etc.

Ceci posé, deux niveaux d'approche sont à considérer : il s'agit d'abord de localiser les sols acides (cartes d'alerte) et, pour ces sols, de cerner plus finement la sensibilité (cartes d'aide au diagnostic).

Une première **carte d'alerte** au niveau national (figure 1) a été publiée dans le n° 15 des *Rendez-vous techniques* (Brêthes et al. 2007). Elle présente de manière grossière les régions dans les-

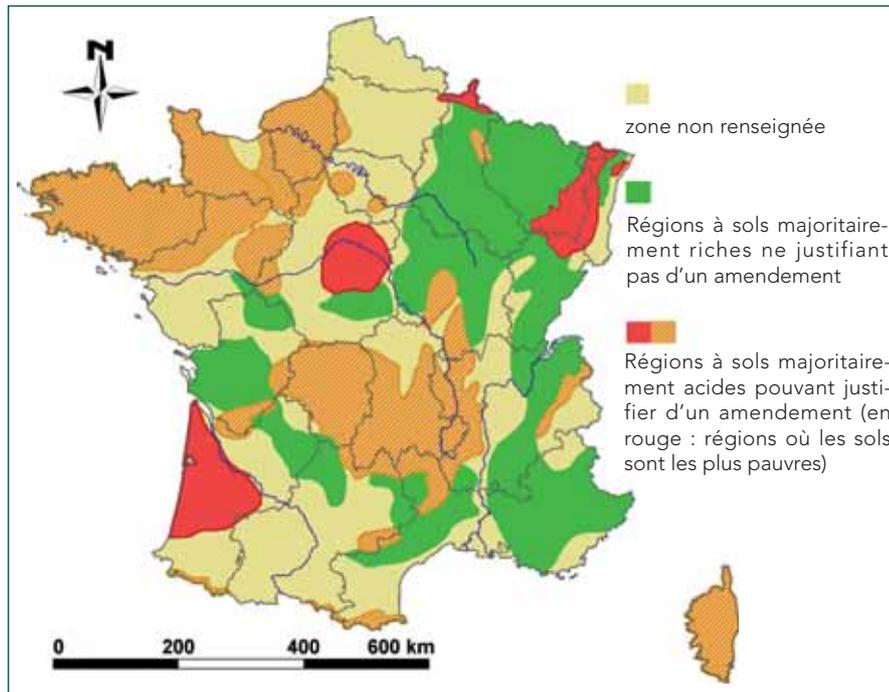


Fig. 1 : carte des grandes régions potentiellement amendables

quelles les sols sont déjà particulièrement pauvres et sensibles au risque d'acidification. Deux lectures de cette carte sont possibles. La première concerne la sensibilité des sols aux exportations minérales, avec une intensification des récoltes pour le bois-énergie notamment, la deuxième va permettre de localiser les régions où les sols, majoritairement acides, peuvent justifier un amendement.

Des cartes d'alerte de ce type peuvent également être établies à l'échelle régionale pour préciser la localisation des sols acides où la question de l'amendement peut se poser. Cet inventaire peut être dégrossi en se basant autant que faire se peut sur les études de typologie des stations forestières. Ces études indiquent souvent le niveau de fertilité des sols de chaque type et une analyse plus particulière des formes d'humus et de la végétation permettra de définir de bons indicateurs.

On pourrait ensuite envisager, à l'occasion des aménagements par

exemple, d'établir à l'échelle du massif forestier des **cartes d'aide au diagnostic** présentant l'état des stocks de nutriments dans les sols. De telles cartes nécessitent des analyses de sols sur les unités pédologiques représentatives de la forêt et une évaluation des stocks existants. L'étude conduite par C. Nys en forêt domaniale de Fougères (Ille et Vilaine) en est un bon exemple (figure 2) ; les stocks de nutriments existants ont été calculés à partir d'une centaine de points échantillon répartis selon la topographie et la nature des sols (stations).

Mais l'absence de telles cartes ne doit pas empêcher localement de définir les sols susceptibles d'amendement ou pas.

Les sols à ne pas amender

Sont à écarter évidemment tous les sols à richesse minérale moyenne ou élevée, correspondant au groupe des matériaux riches, dans une ambiance calcaire ou sur substrats à bonne fertilité minérale, à savoir :

- certains schistes ;
- les roches éruptives riches en micas, en feldspaths de type plagioclases et en minéraux ferromagnésiens (granites calco-alcalins, gabbros et les roches assimilées) ;
- certaines roches volcaniques anciennes comme les trachytes, les porphyres ou certaines rhyolithes (Bretagne, Normandie armoricaine, Massif Central, Vosges, Alpes, Maures et Estérel) ;
- la plupart des matériaux volcaniques récents dont les basaltes en particulier (Massif Central) ;
- les limons récents (grand quart nord-ouest de la France en particulier), etc.

Ces sols ont des stocks actuels en éléments nutritifs « raisonnables » par rapport aux seuils normaux de fertilité minérale et un apport complémentaire n'est pas justifié. Sont ainsi concernés la plupart des sols à humus de forme mull (eumull à oligomull).

Il n'est pas non plus souhaitable d'amender des sols dont la forte acidité est naturelle, et dont la pauvreté est non seulement chimique mais aussi biologique. L'amendement pourrait certes améliorer temporairement leur qualité nutritionnelle mais pas leur fonctionnement biologique car ils ne possèdent pas la faune, les vers fousseurs en particulier, susceptible de développer une activité biologique plus conforme au fonctionnement normal des écosystèmes à acidité moyenne (fonctionnement de mull acide par exemple). L'amélioration serait donc très limitée, de courte durée et correspondrait plus à un effet engrais qu'à ce que l'on attend d'un amendement. Sont à placer dans cette catégorie tous les sols nettement podzolisés développés sur des formations sableuses épaisses et à très faible capacité d'échange comme les sols du massif landais¹, certaines formations sableuses des forêts du Bassin Parisien (sables détri-

¹ Nous excluons les systèmes intensifs de production (ex : pin des Landes) pour lesquels l'amendement/engrais doit compenser les exportations (et épargner les maigres stocks du sol)

tiques de Sologne, sables stampiens de Fontainebleau ou de Rambouillet, sables cuisiers de Compiègne, par exemple), etc. Sont à écarter également les sols pour lesquels le ralentissement de l'activité biologique, et donc l'acidification, sont conditionnés par un climat particulièrement froid (étages montagnard supérieur et subalpin). Il existe ainsi des sols, en particulier dans l'étage montagnard, où, sous peuplement fermé, les humus sont décrits actuellement comme des moders ou des dysmoders à horizon A microgrumeleux (et non de juxtaposition comme dans les vrais moders) ; lors de l'ouverture des peuplements, par exemple pour la mise en régénération, ceux-ci évoluent en quelques années vers des mulls. Cette évolution est tout à fait naturelle, le blocage de l'activité biologique étant plus lié à un aspect climatique (basse température et manque de lumière sous couvert) qu'à un problème de fertilité minérale. Dans ce cas, l'apport d'amendement à titre curatif est inutile.

On n'amendera pas, non plus, les sols à engorgement prononcé (pseudogley vrai ou rédoxisol, gley ou réductisol) pour lesquels la contrainte première est liée à l'excès d'eau en période pluvieuse et, pour les pseudogleys, à la forte sécheresse estivale.

Amender les sols acides... raisonnablement

L'amendement doit donc concerner des sols acides ou dégradés et, parmi ceux-ci, uniquement ceux qui ont encore un certain potentiel de réactivation de l'activité biologique. Ce sont en priorité tous les sols à humus de forme moder à horizon OH peu épais (inférieur à 4 ou 5 cm). On retiendra également les sols à horizon OH plus épais développés sur des matériaux à capacité d'échange cationique (CEC) au moins

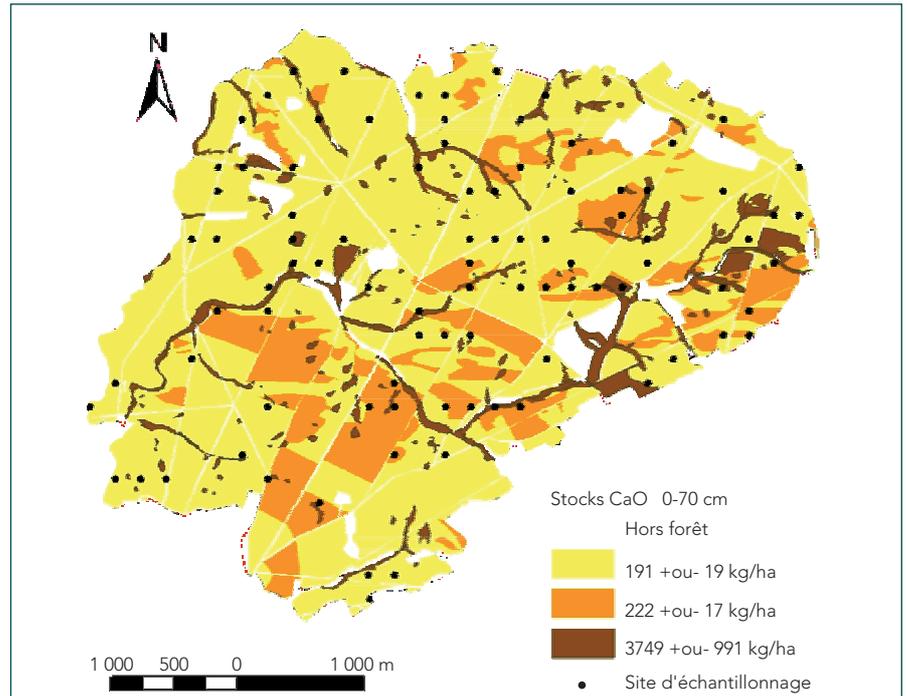


Fig. 2 : exemple de cartographie des stocks de calcium dans les sols de la FD de Fougères (35), établie par C. Nys (INRA-Nancy)

moyenne (ou même faible dans certains cas, en tout cas supérieure à 4 cmol +/-kg).

Les groupements forestiers concernés sont tout particulièrement ceux relevant de la chênaie acidiphile, la chênaie-hêtraie acidiphile, la hêtraie-sapinière acidiphile ou groupements apparentés.

Diagnostiquer les sols potentiellement à risque

Le diagnostic des sols susceptibles d'intervention préventive n'est pas très facile à faire puisque aucun signe de dégradation du sol ou des peuplements n'est encore visible.

Il repose sur la mise en parallèle

- de la sensibilité des sols à l'acidification (capacité à neutraliser ou à supporter ces apports de cations acides),
- des acidifications potentielles par apports atmosphériques acides, exportation par exploitation des bois, etc.,

■ de l'influence des apports atmosphériques non acides (poussières principalement) sur la compensation des exportations (voir figure 3).

La sensibilité des sols à l'acidification est fonction du matériau parental (donc de la formation géologique) et de l'évolution pédogénétique. Pour l'observateur de terrain, elle peut se traduire dans la forme de l'humus (moder, dysmoder et mor, mais aussi quelques rares cas de dysmull voire oligomull) et dans la végétation, comme indicatrice du pH. Cette valeur théorique du pH peut être obtenue en appliquant aux relevés floristiques les coefficients de Gégout (Gégout et al. 2002). On peut considérer comme sols à risque tous les sols dont le pH de surface est inférieur à 5,0 (pH_{eau}).

Sur les sols à risque, l'amendement n'est pas toujours un recours obligatoire. L'adaptation de la sylviculture en termes d'exportations

comparées aux apports (voir figure 3) est parfois suffisante. Toutefois cette démarche nécessite une documentation et des analyses complémentaires souvent complexes. Si un réajustement des pertes (en particulier l'exportation de bois en ce qui nous concerne) peut permettre de maintenir l'équilibre entre départs et apports, l'amendement est inutile. Ce n'est que dans le cas où le risque de pertes avec ses diverses conséquences reste trop élevé compte tenu des possibilités d'ajustement du modèle de gestion, que l'amendement s'impose.

En résumé

En résumé, l'amendement doit être parfaitement raisonné non seulement par rapport au sol mais par rapport à l'ensemble de l'écosystème. Il ne devra concerner que les sols acides ne correspondant pas à des biotopes remarquables. En premier le diagnostic des milieux possibles repose sur la forme d'humus (forme moder, dysmoder et mor) et sur le groupement végétal (peuplement classé acidiphile). Dans un deuxième temps, l'évaluation des stocks existants est nécessaire. Si ce stock est supérieur au seuil de déficience (tableau 1), l'amendement n'est pas obligatoire si l'adaptation du modèle de sylviculture permet d'ajuster l'exportation et les apports naturels. Dans le cas de stocks inférieurs à cette limite, l'amendement semble indispensable même en l'absence de dépérissement notable des peuplements.

Calcul pratique de l'amendement

Afin de respecter le principe d'un apport raisonné, la quantité et la composition de l'amendement seront évaluées à partir d'analyses préalables du sol et du calcul des réserves en nutriments disponibles.

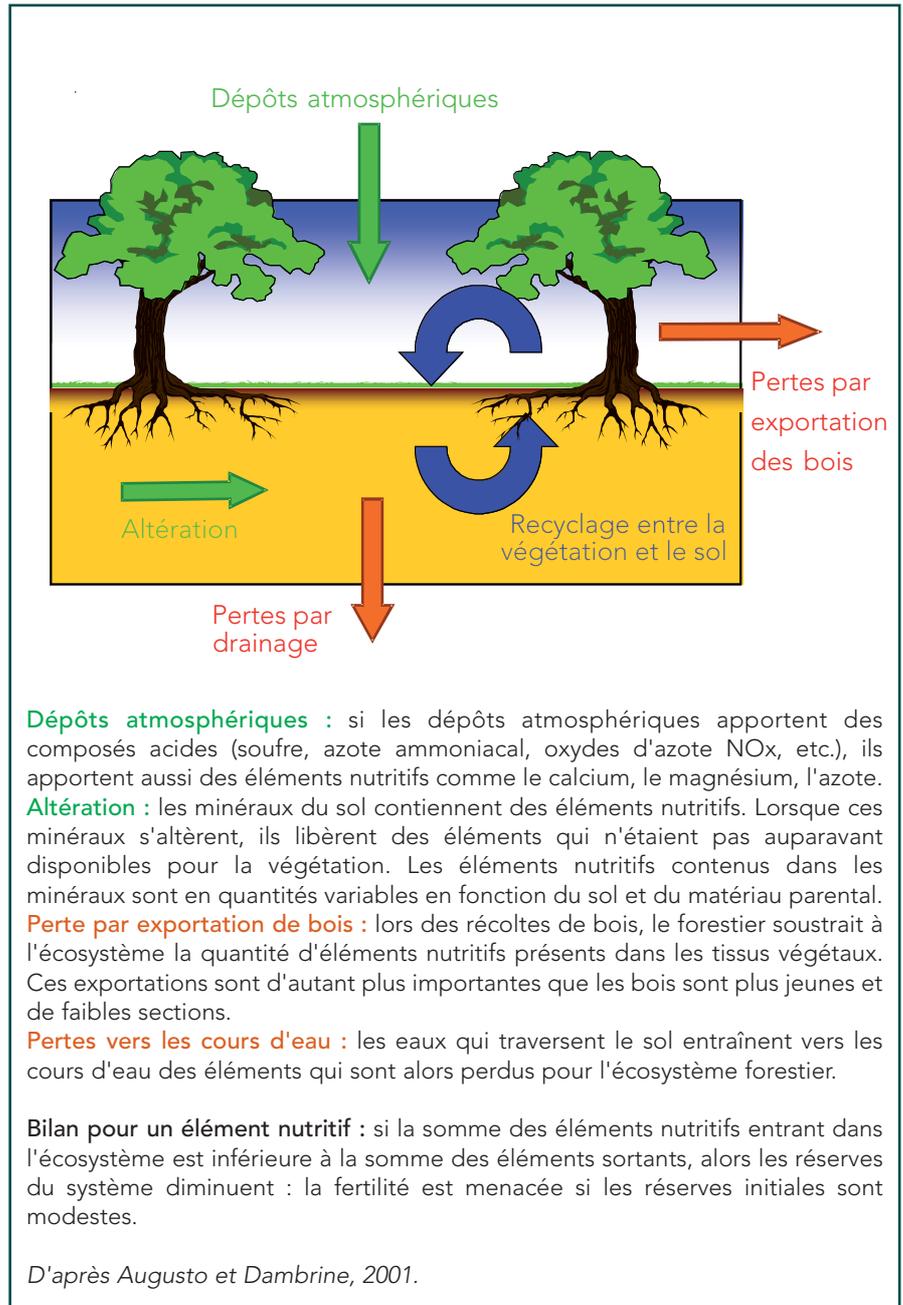


Fig. 3 : la fertilité des sols dépend du bilan des flux d'éléments minéraux

Si l'on cherche à être très précis, le calcul des stocks disponibles (ou réserves) d'éléments minéraux se fera à partir de ces analyses selon la méthode exposée en encadré 1. Ces stocks seront ensuite comparés aux valeurs seuils indiquées au tableau 1. Les apports correspondront alors à la différence entre la « norme de base » et le stock disponible, en veillant à respecter les équilibres indiqués en encadré 2 pour éviter

des toxicités dues à des apports trop importants ou des antagonismes entre éléments. De plus, même si les quantités théoriques à apporter sont importantes, il ne faut pas dépasser un dosage de l'ordre de 1 200 kg/ha de CaO, 200 kg/ha de MgO et 150 kg/ha de K₂O et de P₂O₅ pour éviter des toxicités liées à l'effet « sel » d'apports trop élevés et surtout à des déséquilibres biologiques.

1 - Principe de calcul des stocks de nutriments dans un sol

Est présentée ici la méthode de calcul telle qu'elle peut être réalisée pour un sol donné à partir d'analyse des éléments échangeables et de la mesure de la densité apparente partielle de la terre fine, horizon par horizon ou couche par couche.

Les stocks sont exprimés en kg / ha d'oxyde.

1) Pour un horizon ou une couche d'épaisseur h (en décimètres)

Soit, d'après les analyses, x_{ca} la valeur du calcium échangeable (en centimoles de charge de Ca par Kg de terre fine), x_{mg} la valeur du magnésium échangeable, x_k la valeur du potassium échangeable et x_p la valeur du phosphore extractible. Soit da, la masse volumique partielle de la terre fine pour cet horizon (poids de terre fine seule dans 1dm³ de sol total éléments grossiers compris).

$$\text{Stock de CaO} = h * da * x_{ca} * 280$$

$$\text{Stock de MgO} = h * da * x_{mg} * 200$$

$$\text{Stock de K}_2\text{O} = h * da * x_k * 470$$

$$\text{Stock de P}_2\text{O}_5 = h * da * x_p * 1000$$

2) Pour la totalité du sol, on fait la somme des stocks par élément obtenus pour chacun des horizons selon le calcul précédent. Cette somme se fait généralement pour les 70 premiers cm du sol.

Ces valeurs sont ensuite comparées aux normes calculées par l'INRA (C. Nys et M. Bonneau ; voir tableau 1).

Une méthode plus simple consiste à utiliser la modélisation REGESOL qui permet d'estimer ce stock à partir de la seule analyse (éléments échangeables, granulométrie, etc.) de la couche minérale 0-15 cm.

Le logiciel REGESOL d'aide au diagnostic de fertilité minérale du sol, développé par l'INRA de Nancy et la Société Forêt et Amendements de Belgique, simplifie fortement ce calcul. Il permet à partir d'une simple analyse des 15 premiers centimètres du sol (échantillon composite de plusieurs prélèvements hors humus sur la parcelle concernée) d'estimer les stocks actuellement disponibles et les besoins en amendement en fonction de l'essence objectif et de la sylviculture envisagées (Larrieu *et al.*, 2006). Ce logiciel vient d'être finalisé et est disponible sur le Web (www.regesol.com).

La mise en œuvre de l'amendement

Le diagnostic des zones à amender à l'échelle d'un massif étant réalisé, on peut envisager un amendement en une fois de l'ensemble des zones concernées (épandage aérien) ou de procéder

Pour le hêtre	Diagnostic	Norme de déficience (kg/ha)	Diagnostic	Norme de base (kg/ha)	Diagnostic	Norme de réserve (kg/ha)	Diagnostic
Pour le hêtre							
K ₂ O	Réserves très insuffisantes	377	Réserves insuffisantes	520	Réserves optimales par rapport aux besoins	858	Pas de problème
CaO	Risque de carence à court terme	581	Risque de carence à moyen terme	308		532	
MgO		210		540		1026	
P ₂ O ₅ *		378					
Pour les chênes							
K ₂ O	Réserves très insuffisantes	406	Réserves insuffisantes	560	Réserves optimales par rapport aux besoins	924	Pas de problème
CaO	Risque de carence à court terme	622,5	Risque de carence à moyen terme	297		513	
MgO		202,5		600		1140	
P ₂ O ₅ *		420					
Pour les résineux							
K ₂ O	Réserves très insuffisantes	290	Réserves insuffisantes	400	Réserves optimales par rapport aux besoins	660	Pas de problème
CaO	Risque de carence à court terme	415	Risque de carence à moyen terme	220		380	
MgO		150		400		760	
P ₂ O ₅ *		280					

* P₂O₅ assimilable mesuré par la méthode Duchaufour.

Tab. 1 : normes de fertilité des sols ; stock d'éléments en kg/ha sous forme d'oxyde pour une épaisseur de sol de 70 cm (C. Nys d'après Bonneau 1995)

2 - Rapport entre éléments échangeables dans un sol pour un bon équilibre nutritionnel

Equilibre entre calcium, magnésium et potassium :

- Ca^{++} doit être largement supérieur à Mg^{++} qui doit être lui-même supérieur à K^+ ($Ca^{++} \gg Mg^{++} > K^+$)
- le rapport entre K^+ et Ca^{++} (K^+ / Ca^{++}) doit être supérieur à 0,03
- de même, le rapport entre Mg^{++} et K^+ (Mg^{++} / K^+) doit être inférieur à 2

Equilibre entre calcium, magnésium et aluminium :

- le rapport entre Ca^{++} et Al^{+++} (Ca^{++} / Al^{+++}) doit être supérieur à 1 dans l'horizon A et à 0,15 dans les horizons minéraux
- de même, le rapport entre Mg^{++} et Al^{+++} (Mg^{++} / Al^{+++}) supérieur à 0,4 dans l'horizon A et à 0,04 dans les horizons minéraux

plus progressivement, parcelle par parcelle : dans ce cas se pose la question de savoir si un stade de la vie du peuplement est plus particulièrement favorable.

À quel stade de la vie du peuplement doit-on intervenir ?

Le choix de la période d'intervention dépend alors de l'objectif recherché.

La dynamisation de l'activité biologique du sol peut être souhaitée à tout moment dans la vie d'un peuplement mais particulièrement au stade du renouvellement, pour faciliter l'acquisition de la régénération naturelle et la croissance des semis. Dans ce cas, l'intervention est à programmer avant la mise en régénération du peuplement, en fin de période d'amélioration. Pour tenir compte du temps de réaction des sols forestiers, fonction de leur état initial, une fourchette de 5 à 10 ans avant les premières coupes d'ensemencement semble un délai raisonnable. Dans le cas d'une plantation après coupe rase, il est préférable d'amender avant travail du sol, ce qui permet d'enfouir l'apport.

S'il s'agit de faire face au dépérissement constaté d'un peuplement, l'intervention est à programmer dès que possible, sans tenir compte du stade sylvicole. Dans ce cas, l'intervention aura pour finalité d'améliorer la nutrition des arbres plus que de relancer l'activité biologique des sols.

Quelle est la saison la plus favorable ?

Pour obtenir le maximum d'efficacité de l'amendement, il est souhaitable que les éléments soient en place au moment de la reprise de l'activité biologique au début

du printemps. L'apport est donc à réaliser en fin d'automne ou durant l'hiver.

La période exacte dépend de la technique d'épandage retenue.

Pour un épandage aérien, il n'y a aucune contrainte particulière sinon le temps (pluie et vent) qui peut limiter le vol des avions ou hélicoptères.

Pour un épandage terrestre, que ce soit en plein sur la parcelle ou à partir des cloisonnements d'exploitation, il faut éviter le risque de tassement des sols par les tracteurs-épandeurs. Un travail sur sol sec, ou gelé, est donc à privilégier. Selon le climat local, ceci peut correspondre à la fin de l'été, à l'automne ou au plein hiver.



S. Leblond, ONF



G. Del Marmol (Belgique)

Comment amender ?

Trois techniques d'épandage sont possibles : les apports aériens, la projection à partir des cloisonnements ou la dispersion en plein.

L'**épandage aérien** peut se faire par avion ou par hélicoptère. En raison de son coût, cette technique est à réserver au traitement de grandes surfaces forestières (supérieures à 200 ou 300 ha) et en relief mouvementé (montagne tout particulièrement) pour lequel d'autres méthodes ne sont guère envisageables.

La **projection** à l'aide d'une turbine, se fait à partir des cloisonnements d'exploitation. Le tracteur ne parcourt donc pas la surface de la parcelle. Les souffleries ayant en général une portée de 25 à 60 m selon la puissance de la turbine, l'utilisation de cloisonnement à 50 m est tout à fait envisageable. La répartition de l'amendement ne sera pas parfaitement homogène, selon la distance au cloisonnement et en raison des obstacles que constituent les arbres. Cette variabilité conduit à des sous-dosages ou inversement à des surdosages selon un gradient transversal souvent prononcé.

Le parfait respect des conditions d'utilisation des engins, une distance de projection limitée à 25 m (cloisonnement à 50 m) et un épandage « croisé » peuvent permettre une bonne répartition du produit. Une analyse détaillée de ce type d'intervention a été publiée par Weissen et Delecour (1994) et par Maréchal (1993).

La **dispersion en plein** consiste à apporter l'amendement sur l'ensemble de la surface à traiter soit manuellement, soit à l'aide d'un tracteur équipé d'un épandeur à engrais. Dans ce dernier cas, le tracteur doit parcourir toute la surface de la parcelle, ce qui ne peut se concevoir qu'à certaines périodes de l'année pour limiter le tassement du sol. Cette pra-



ONF

tique convient sur terrain à faible pente, peu rocheux et non encombré de souches ou de branches. Elle particulièrement aisée dans le cas d'une coupe rase, mais difficile à mettre en œuvre dans les peuplements adultes fermés.

Les coûts sont dégressifs selon la quantité d'amendement à épandre donc selon la surface à traiter. On peut ainsi considérer qu'au-delà d'une surface de l'ordre de 200 ha l'utilisation de l'hélicoptère devient envisageable voire obligatoire pour des traitements de surface encore plus grande (ensemble de parcelles d'une même forêt, bassin-versant par exemple). Sur les coûts, voir tableau 2 p. 72.

Conclusion

L'enjeu premier de la pratique de l'amendement n'est pas la rentabilité économique bien que le recul expérimental d'environ 30 années montre, dans les cas où l'amendement était nécessaire, un gain de productivité de 5 à 25 % selon l'état initial de dégradation des sols.

L'amendement permet surtout d'améliorer l'état sanitaire des

peuplements ou de leur permettre de surmonter les stress liés notamment aux aléas climatiques et de prévenir de possibles dépérissements.

Les gains obtenus sur la croissance des peuplements font partie des effets annexes qui ne sont pas l'objectif premier de l'amendement mais qu'il ne faut pas négliger pour autant. Également, l'amendement facilite la réussite des régénérations, tant naturelles qu'artificielles.

Les résultats présentés dans ces deux articles montrent que l'amendement n'est pas une solution générale à tous les problèmes de pauvreté chimique des sols et doit être parfaitement raisonné. Nos pratiques sont malgré cela encore trop limitées : le forestier serait-il frileux vis-à-vis de cette intervention ? Pourtant il est indéniable que l'amendement s'intègre parfaitement dans la problématique de la gestion durable des forêts dans la mesure où la démarche proposée est respectée.

Alain BRÊTHES

ONF, DT Centre-Ouest
Direction Forêt
alain.brethes@onf.fr

Analyses de sols (laboratoire INRA d'Arras)	échantillon individuel	groupe d'analyses nécessaires au logiciel Regesol
	17 €HT par échantillon pour les éléments échangeables seuls, soit 68 €HT pour un sol à 4 niveaux (sans les mesures de masse volumique)	70 €HT par échantillon Ensemble complet d'analyses pour un prélèvement moyen de la surface à traiter.
Matière première	Calcaire + dolomie + phosphates + potassium (expériences forêts de l'Ouest)	dolomie + sulfate de potassium (expérience lorraine)
	450 €HT/ha pour 3 t/ha (prix 2007)	250 €HT/ha pour 2 t/ha (estimation 2007)
Méthode d'apport	échelle de coût	exemples de prix
Terrestre, en plein : Épandage manuel	++++	Très coûteux (heure d'ouvrier environ 25 €). A réserver à des surfaces très limitées.
Terrestre, en plein : Tracteur à épandeur rotatif	++	35 €HT/ha (marché ONF 2007) pour des surfaces voisines de 100 ha
Terrestre, par projection : Tracteur avec souffleuse	++	60 €HT pour 100 à 200 tonnes* 50 €HT pour 200 à 300 tonnes*
Aérien, par hélicoptère	+++	110 €HT pour 100 à 200 tonnes* 95 €HT pour 200 à 300 tonnes* 80 €HT pour 300 à 400 tonnes* 75 €HT pour plus de 400 tonnes*

* Données fournies par R. Collet de la Société Forêt-Amendement (Belgique). Les prix pour le traitement par hélicoptère sont établis ici sur des références de l'Est de la France (Vosges) avec un coût "d'approche" de l'appareil relativement modéré.

Tab. 2 : quelques indications de coûts

Bibliographie

AUGUSTO L., DAMBRINE E., 2001. L'acidification dans le massif vosgien : comprendre les mécanismes et apporter des solutions. Brochure INRA, 38 p.

BONNEAU M., 1966. La fertilisation forestière. Revue Forestière Française, vol. 18, n° 8-9, pp. 552-574

BRÊTHES A., PARTY J.P., GÉGOUT J.C., DAMBRINE E., NICOLAS M., 2007. Carte de sensibilité des sols de France aux exportations minérales. In Bois-énergie : maîtriser les impacts. Rendez-vous techniques, n° 15, pp. 36-45

GÉGOUT J.C., COUDUN C., BRISSE H., BERGES L., 2002. Comportement écologique des espèces forestières vis-à-vis du cli-

mat et du sol en France : application à l'évaluation des charges critiques d'acidité et d'azote. Rapport final de la convention ADEME/ENGREF n° 99 62 003. LERFOB, ENGREF-Nancy, 51 p.

LARRIEU L., JABIOL B., NYS C., 2006. Prise en compte de la fragilité chimique des sols forestiers dans les conseils de gestion : illustration pour une sapinière-hêtraie montagnarde sur roche acide (Vallée d'Aure, Hautes-Pyrénées). Revue Forestière Française, vol. 58, n° 6, pp. 531-548

MARECHAL P., 1993. Etude des performances d'un épandeur-souffleur pour le traitement des peuplements dépérissants. Silva Belgica, vol. 100, n° 4, pp. 21-28

NYS C., 2006. Les remèdes existants : La restauration des sols

acides par l'amendement calco-magnésien : une technique au point, mal relayée par les organismes professionnels et trop peu répandue. La Forêt Privée, n°289, pp. 33-40

PARTY J.P., PROBST A., THOMAS A.L., DAMBRINE E., 2001. Charges critiques d'acidité en polluants atmosphériques : conséquences vis-à-vis des sols et des peuplements forestiers. Pollution atmosphérique, n° 172, pp. 519-527

WEISSEN F., DELECOUR F., 1994. Apports d'amendements en pesières menacées de dépérissement : qualité de l'épandage, effets sur le sol et les peuplements. Rapport du Ministère de la Région Wallonne, Belgique. 37 p.

Conserver les ressources génétiques de l'épicéa commun en France : pourquoi, comment ?

Suite de notre série sur les réseaux de conservation *in situ* des ressources génétiques des espèces forestières en France : après la philosophie du dispositif général et la conception du réseau pin sylvestre, dans le précédent numéro des Rendez-vous techniques, voyons ici le cas du réseau épicéa.

Une essence résineuse majeure du paysage forestier national

L'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst) couvre 910 000 ha, soit 6,2 % de la surface forestière française de production (figure 1), dont 57 % sous forme de peuplements mélangés ; seulement 100 000 hectares environ seraient d'origine autochtone (Favre, comm. pers). Il représente 8,1 % du volume de bois sur pied disponible en France et 21,8 % du volume sur pied de conifères (IFN 2006). Largement utilisé en boisement/reboisement (plus de 700 000 hectares de plantations au total), l'épicéa commun a depuis la fin du 19^e siècle constitué une des principales essences employées en moyenne montagne et en plaine (principalement dans le Nord-Est). Les années 1970 marquèrent l'apogée de cette espèce avec 40 millions de plants produits et 10 000 ha plantés avec l'aide du Fonds Forestier National. Cet effort de boisement et les transferts de matériel végétal induits ont affecté aussi bien les zones d'autochtonie que le reste du territoire (Normandie, Massif Central, Nord-Est et plus marginalement les Pyrénées).

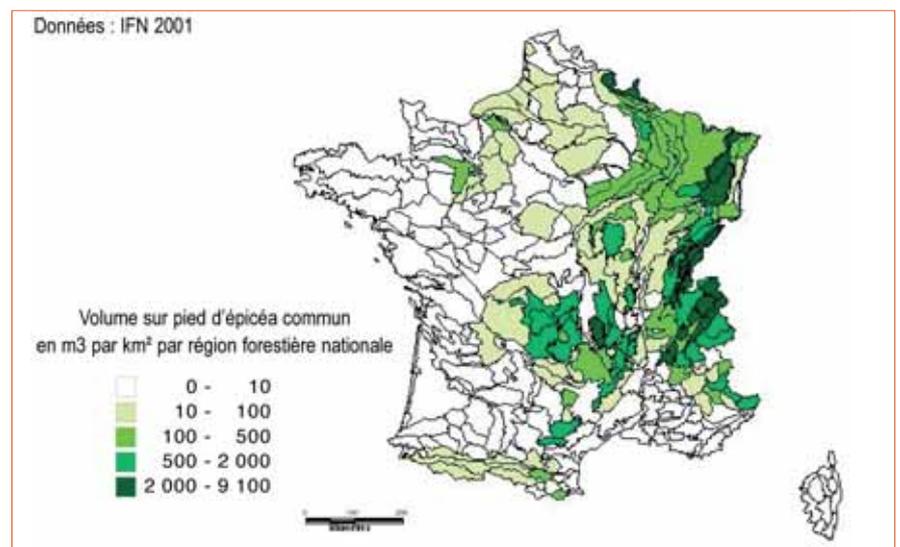


Fig. 1 : répartition et importance (en volume) de l'épicéa commun en France (source : IFN 2001)

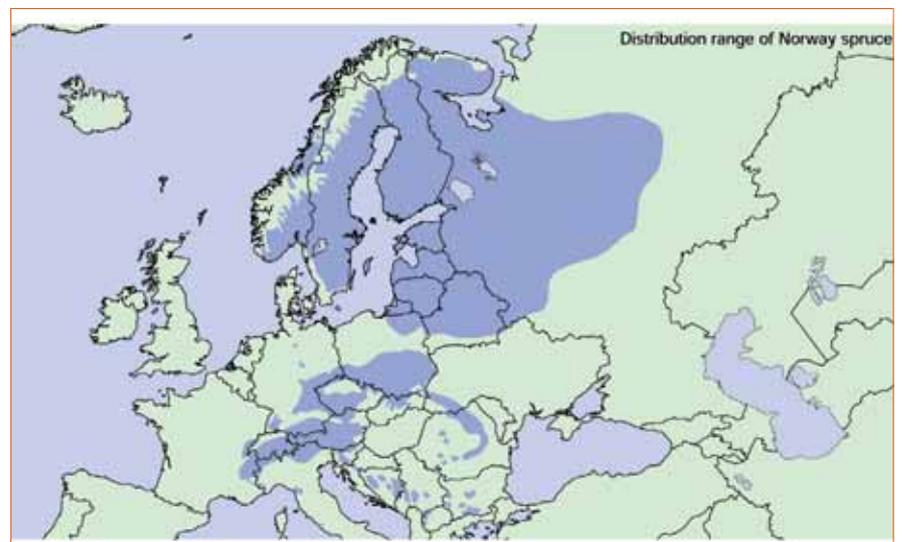


Fig. 2 : aire naturelle de distribution de l'épicéa commun et zones d'autochtonie en France (Skrøppa, 2003)

En dehors de son aire naturelle, l'épicéa commun est même parfois considéré comme une invasive forestière en raison de ses capacités de fructification et de sa moindre sensibilité aux dégâts de gibier (Bartoli, 2003).

Une situation marginale au sein de l'aire naturelle de distribution

L'aire naturelle de l'épicéa commun est très vaste : elle couvre 31° de latitude des Balkans à la Sibérie et 150° de longitude des Alpes françaises à la mer d'Okhotsk (figure 2). À l'échelle de la France, les populations autochtones se rattachent au domaine alpin de l'aire naturelle, en limite sud-ouest de l'aire de répartition et occupent l'étage montagnard. Elles sont réparties dans plusieurs massifs montagneux (Vosges, Jura, Alpes du nord et du sud) et couvrent une large gamme de conditions pédoclimatiques. La diversité des habitats naturels à épicéa commun recensés en France dans les étages montagnard et subalpin (encadré) traduit cette diversité de conditions écologiques. Les populations naturelles d'épicéa commun de ces régions peuvent ainsi avoir développé des spécificités adaptatives d'intérêt, en particulier à des conditions thermiques et hydriques extrêmes.

Au carrefour de différentes voies de recolonisation postglaciaire ?

Au sein de l'aire naturelle, la diversité génétique de l'épicéa commun se structure en trois zones géographiques distinctes, qui correspondent à trois scénarios de reconquête postglaciaire, comme le confirment à la fois des études palynologiques et des analyses par marqueurs moléculaires (figure 3) :

Liste des habitats naturels de pessières selon typologie Corine Biotope

42.2 Pessières

- 42.21 Pessières subalpines des Alpes
 - 42.211 Pessières à airelle
 - 42.212 Pessières subalpines à hautes herbes
 - 42.2121 Pessières subalpines calcicoles à hautes herbes
 - 42.2122 Pessières subalpines silicicoles à hautes herbes
 - 42.213 Pessières subalpines à sphaignes
 - 42.214 Pessières subalpines xérophiles
 - 42.215 Pessières de stations froides
- 42.22 Pessières montagnardes des Alpes internes
 - 42.221 Pessières montagnardes intra-alpines acidiphiles
 - 42.222 Pessières montagnardes intra-alpines calciphiles
 - 42.223 Pessières montagnardes intra-alpines xérophiles
 - 42.224 Pessières montagnardes intra-alpines à hautes herbes
 - 42.225 Pessières montagnardes intra-alpines à sphaignes
- 42.25 Pessières extrazonales
 - 42.251 Pessières subalpines du Jura
 - 42.253 Pessières montagnardes à déterminisme édaphique
 - 42.254 Pessières de la zone montagnarde du hêtre
- 42.26 Reboisements d'épicéa (pour mémoire)

Ne sont pas cités ici les habitats de sapinières-pessières neutrophiles, calciphiles et acidiphiles (n° 42-11 à 42-13)

■ la **zone nordique** (Scandinavie, Pays baltes, Pologne nord, Russie) colonisée à partir d'un refuge glaciaire situé en Russie occidentale dans la plaine de Moscou ; cette zone baltico-nordique se serait séparée très tôt des deux autres zones ;

■ la **zone hercynienne carpatique** (Allemagne, Pologne sud, République tchèque, Slovaquie, Roumanie) issue d'un refuge non précisément identifié dans les Balkans ;

■ la **zone alpine** (l'essentiel de l'arc alpin depuis l'Est de la France jusqu'au nord de la Grèce). À partir d'un refuge situé dans les Alpes Dinariques, les routes de colonisation est-ouest auraient atteint le Jura puis auraient bifurqué vers les Vosges et les Alpes. Les Vosges semblent en outre le massif le plus

récemment occupé. Un refuge secondaire en Toscane aurait également contribué à la reconquête des Alpes par le sud de la chaîne (Scotti et al. 2000). Certains auteurs n'excluent pas la persistance d'un autre refuge glaciaire secondaire dans le Mercantour ou ses environs (Collignon et Favre, 2000).

Grâce à ses capacités reproductrices et à un fort pouvoir de dissémination de ses graines, l'épicéa commun a profité de l'absence de concurrence interspécifique et de climats plutôt secs pour coloniser efficacement (1 à 2 km/an) les terrains non forestiers libérés par le retrait des glaciers. Il a subi en revanche la compétition du sapin pectiné lors d'épisodes climatiques postglaciaires plus

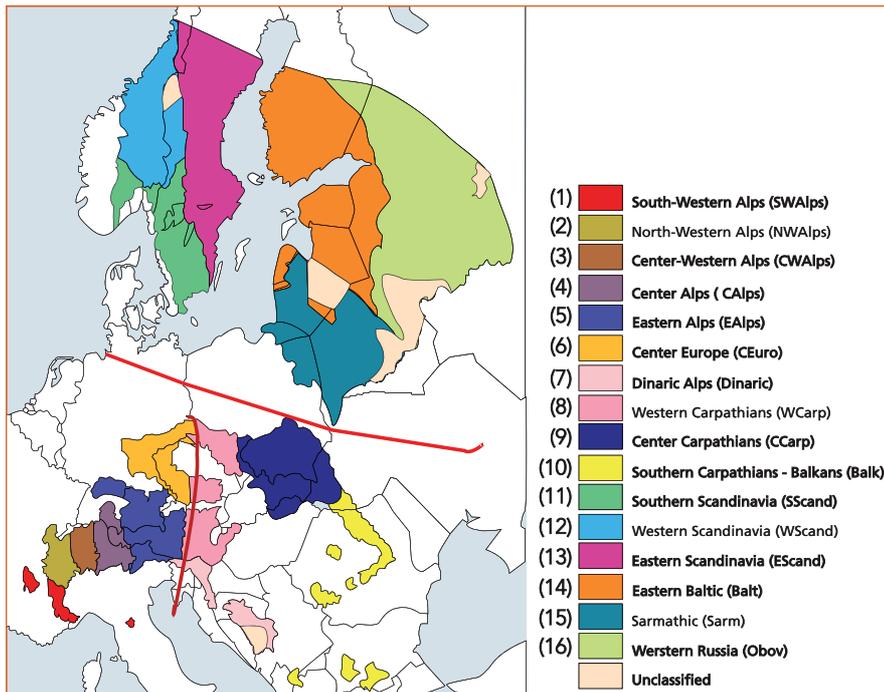


Fig. 3 : à partir des résultats d'analyses de marqueurs moléculaires de l'ADN chloroplastique, on distingue trois grandes zones de recolonisation postglaciaires pour l'épicéa commun en Europe : une zone alpine et centre-européenne (régions 1 à 6), une zone centre-est européenne (régions 7 à 10) et une zone baltico-scandinave (régions 11 à 16) (Bucci et Vendramin 2000)

humides, ce qui a notamment réduit sa vitesse de migration dans l'arc alpin (Ravazzi 2002, Van der Knaap et al. 2005).

Une structuration de la diversité génétique peu précise au niveau national

À l'échelle de l'aire naturelle, la structuration spatiale de la diversité génétique neutre de l'épicéa commun est désormais bien caractérisée en trois grands domaines géographiques (figure 3). L'isolement des refuges glaciaires dont sont issues ces populations explique leur degré de différenciation génétique, qui est toutefois fortement contrebalancé par des flux de gènes importants entre populations, phénomène fréquent chez les espèces forestières à large aire de distribution. Chez l'épicéa commun, comme chez beaucoup d'autres essences forestières, l'essentiel de la diversité

Marqueurs	Nb. de populations françaises testées	Résultats	Interprétation
ADN mitochondrial ¹	3	Les populations de l'ouest des Alpes sont monomorphes	Effet de la colonisation par graines à partir de très peu d'individus
RAPD ²	7	Distinction Vosges – Alpes/Jura – Alpes du sud	Subdivision possible des populations françaises en 3 grands groupes. Impossibilité de distinguer Jura et Alpes du nord
ADN mitochondrial ²	7	Distinction entre populations autochtones et allochtones des Vosges	Possibilité d'identifier des populations non autochtones issues de transferts de graines dans les Vosges
RAPD ³	25	Distinction Vosges – Jura – Alpes du sud. Distinction entre Alpes du sud, Alpes du nord et Alpes Occidentales (Chartreuse)	Subdivision possible des populations françaises en 3 grands groupes et des Alpes en 3 sous-groupes latitudinaux
RAPD ⁴	4	Distinction Vosges/Jura – Alpes du nord – Alpes du sud.	Subdivision possible des populations françaises en 3 grands groupes. Impossibilité de distinguer Vosges et Jura

1 : Gugerli et al. 2001 ; 2 : Jeandroz et al. 2004 ; 3 : Collignon et Favre 2000 ; 4 : Collignon et al. 2002

Tab. 1 : principaux résultats d'analyses de la diversité génétique neutre de populations françaises d'épicéa commun

génétique se trouve à l'intérieur même des populations plutôt qu'entre populations (Acheré et al. 2005) : en d'autres termes, les arbres d'une même population diffèrent plus entre eux que ne diffèrent entre elles des populations distinctes.

À l'échelle française, la répartition spatiale de la diversité génétique des populations autochtones (mesurée avec des marqueurs moléculaires non soumis à sélection naturelle) n'est pas connue avec précision mais les travaux incluant des populations françaises (tableau 1) permettent de dégager quelques grands traits :

- une différenciation génétique entre d'un côté les Alpes du sud, et de l'autre les Alpes du nord et les Vosges.
- une absence de différenciation génétique entre Alpes du nord et Jura. Par contre, il existe une différenciation significative entre le Jura et les Vosges.

Ces résultats confirment d'une part le caractère original des Vosges et des Alpes du sud mais aussi le rôle majeur du Jura comme foyer de recolonisation des Alpes du nord.

Le morcellement des populations des Alpes du sud (en raison du relief notamment) et leur faible taille – tout comme pour les rares populations autochtones vosgiennes – peuvent laisser craindre une faible variabilité génétique intrapeuplement. Si tel était le cas, notamment pour certains caractères adaptatifs, leurs possibilités de réponse à des modifications environnementales seraient alors limitées. L'évaluation de la variabilité génétique au sein de ces populations et la mesure de leur degré de différenciation génétique représentent donc un enjeu important.

Des menaces nombreuses et pressantes

Plusieurs facteurs viennent en effet menacer aujourd'hui le maintien de la diversité génétique présente dans les populations naturelles d'épicéa commun en France :

- depuis plusieurs siècles, des transferts importants de graines ont été effectués à travers l'Europe, induisant des brassages importants entre populations allochtones et autochtones. L'intensité de ces échanges et les lacunes des archives forestières rendent aujourd'hui délicate l'identification de peuplements véritablement autochtones.
- les dépérissements importants observés dans les années 1980 en Europe Centrale et dans les Vosges suite aux pluies acides, localement aggravés par des sécheresses sévères et qui ont fortement affecté certaines populations autochtones.
- plusieurs événements climatiques violents, et en particulier la tempête de 1999, ont conduit à la destruction physique de nombreux peuplements adultes, réduisant parfois drastiquement le nombre d'arbres assurant la régénération naturelle dans les peuplements autochtones.
- les dépérissements consécutifs aux attaques de scolytes (typographe, chalcographe) et de dendroctone (source : DSF). On notera que plusieurs de ces menaces (transferts de graines, tempête) ne sont pas spécifiques à l'épicéa commun mais affectent aussi d'autres espèces sociales comme le pin sylvestre par exemple (voir l'article de Bastien et Valadon dans RDVT n°17).

En ce qui concerne les dépérissements liés aux scolytes, les dommages en pessières, essentiellement causés par *Ips typographus*, sont variables selon les régions.

Restés à l'état endémique dans le grand Ouest et une partie du Massif Central, ils s'avèrent importants dans le sud du Massif Central, en Ariège et en Bourgogne. Mais c'est surtout l'Est de la France, et donc la zone de l'aire naturelle de l'épicéa, qui connaît les dommages les plus importants. Le volume scolyté exploité en 2005 a ainsi dépassé 150 000 m³ dans la région Rhône Alpes, et a atteint un volume record de 285 000 m³ dans le massif du Jura et 160 000 m³ dans les Vosges (baisse notable par rapport à 2004).

Le total des récoltes d'épicéas scolytés en 2005 est au moins égal à 650 000 m³. Depuis la tempête de 1999, ce sont 2,5 millions de m³ qui ont ainsi été récoltés. Le pic endémique de 2001 correspondait aux zones très touchées par la tempête (massif vosgien). Dans les zones épargnées (Alpes), on assiste à une montée progressive des attaques et des récoltes depuis la sécheresse de 2003. Les volumes scolytés exploités en 2006 sont partout à la baisse, en raison des conditions climatiques de l'été plus favorables à l'épicéa (printemps humide, août froid...) et certainement suite à une progression du complexe parasitaire de l'insecte. (Bilan de la santé des forêts en 2006 – Région Rhône Alpes)

Dans les montagnes de l'Est, les pessières touchées sont plutôt celles de basse altitude en dehors de l'aire optimale (< 900 m dans les Alpes, < 700 m dans le Jura et les Vosges et sur calcaire très filtrant).

Un réseau national d'unités conservatoires

Critères et méthode de sélection

Au vu des diverses menaces qui pèsent sur cette espèce dont l'importance écologique et économique est majeure, la Commission

Dépt.	Commune	Forêt	Altitude	Exposition	Pluviométrie	Région
04	BAYONS	Gorges du Sasse	1600	N	850	ALPES SUD
04	MEOLANS-REVEL	Col de la Pierre	1900	NE	1000	ALPES SUD
05	SAINT-ETIENNE-EN-DEVOLUY	St Etienne Dévoluy	1600	N	1400	ALPES SUD
05	NEVACHE	Névache	1800	N	790	ALPES SUD
05	VARS	Vars	1900	N	800	ALPES SUD
06	SAINT-MARTIN-EN-VESUBIE	St Martin en vésubie	1750	N	1800	ALPES SUD
26	SAINT-AGNAN-EN-VERVORS	Vercors	1400	Plateau	1350	ALPES NORD
26	LUS-LA-CROIX-HAUTE	Lus la croix haute	1500	NO	1250	ALPES SUD
38	VENOSC	Vénosc	1750	N	1100	ALPES NORD
38	OULLES	Oulles	1850	O	1900	ALPES NORD
39	NOZEROY	Haute Joux	1180	NO	1930	JURA
39	PREMANON	Massacre	1300	Plateau	2000	JURA
68	MUNSTER	Munster - Frankenthal	900	NO	1800	VOSGES
73	ENTREMONT-LE-VIEUX	Entremont-le-vieux	1250	NO	1700	ALPES NORD
73	AILLON-LE-VIEUX	Aillon le vieux - Cimeteret	1400	E	1800	ALPES NORD
73	JARRIER	Jarrier	1600	NE	1300	ALPES NORD
73	SAINT-JEAN-D'ARVES	St Jean d'Arves	1700	SE	2000	ALPES NORD
73	BOURG-SAINT-AURICE	Bourg St Maurice - Hauteville Godon	1800	O	1300	ALPES NORD
73	SAINT-JEAN-DE-BELLEVILLE	St Jean de Belleville	1800	NE	900	ALPES NORD
73	LANSLEBOURG-MONT-CENIS	Lanslebourg	1900	S	900	ALPES NORD
74	DINGY-SAINT-CLAIR	Dingy St Clair	1350	SE	1800	ALPES NORD
74	SIXT-FER-A-CHEVAL	Sixt - Belleface	1500	NO	2000	ALPES NORD
88	GRANGE-SUR-VOLOGNE	Vologne - Le Kertoff	600	NE	1800	VOSGES
88	BAN-SUR-MEURTHE	Haute Meurthe - Straiture	800	N	1800	VOSGES

Tab. 2 : Principales caractéristiques stationnelles des unités conservatoires retenues

nationale des ressources génétiques forestières (CRGF, Ministère en charge des forêts) a souhaité mettre en place un réseau de conservation des ressources génétiques de cette espèce. L'objectif de ce réseau, comme de ceux qui sont déjà en place (par exemple sapin pectiné, hêtre, chênes européens) est de préserver l'originalité et la capacité de l'épicéa à évoluer dans son milieu naturel. Le réseau, constitué d'unités conservatoires, doit donc représenter toute la diversité écologique et génétique de l'épicéa en France. Des réseaux similaires se mettent aussi (ou sont déjà) en place dans d'autres pays européens (<http://www.biodiversityinternational.org/networks/euforgen/>).

Cinq critères principaux ont été retenus pour sélectionner les unités conservatoires : génétique (les grands domaines géographiques structurant la diversité), géographique (les massifs et vallées majeures) tout en privilégiant la limite sud de l'aire dans les Alpes méridionales, démographique (le nombre d'arbres reproducteurs et la pré-

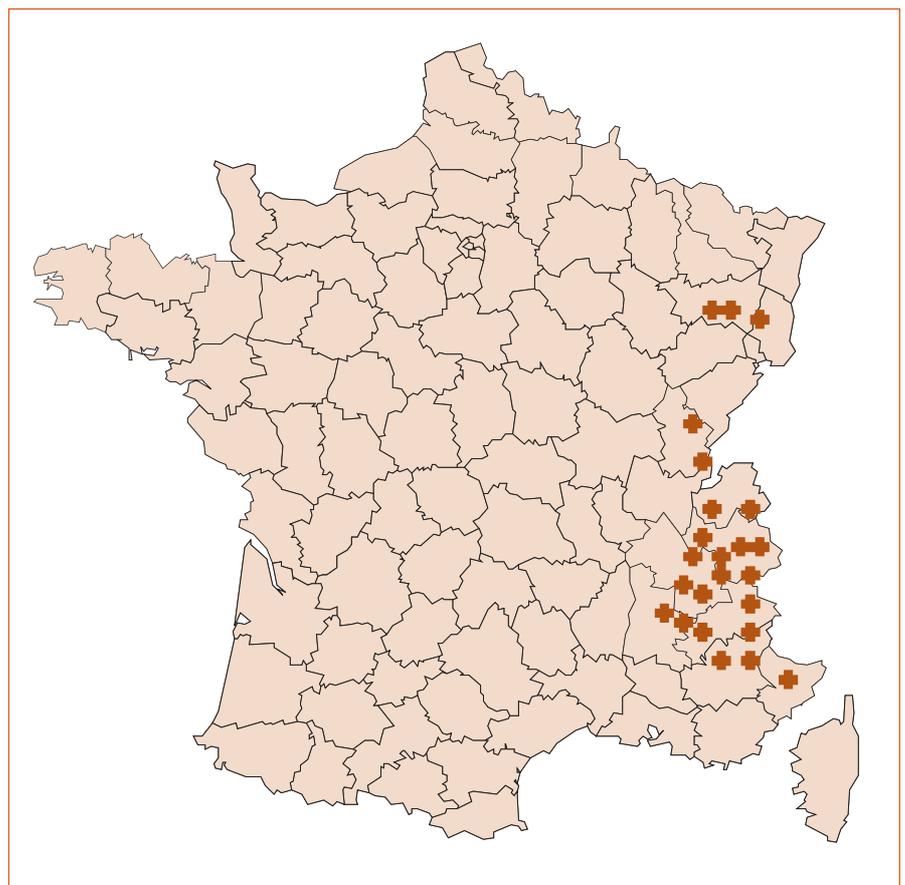


Fig. 4 : répartition géographique des 24 unités conservatoires in situ d'épicéa commun

sence de semis), l'autochtonie du peuplement et enfin le statut de forêt publique (pour garantir la pérennité du réseau). En outre, des conditions écologiques particulières (pessière sur sol gelé) ont également été recherchées pour accroître la diversité des conditions stationnelles et donc augmenter la variabilité adaptative des ressources génétiques.

Une enquête auprès des services gestionnaires de l'ONF a fourni une quarantaine de propositions en 2004. En 2005 et 2006, des visites de terrain et des recueils de données complémentaires (historique, traitement sylvicole, structure du peuplement et dynamique de régénération, données stationnelles, état sanitaire, risques de pollution génétique par hybridation entre populations autochtones et variétés introduites, statut de protection) ont finalement permis à la CRGF de retenir 24 peuplements naturels ou unités conservatoires *in situ*. Les principales difficultés rencontrées concernent l'autochtonie des peuplements ou leur histoire démographique.

Pour l'**autochtonie**, le chapitre historique des aménagements consultés est souvent très succinct, et la tenue des sommiers est la plupart du temps postérieure aux années 1970. La présence d'arbres d'âge supérieur à 200 ans (régénération plus ancienne que les premières grandes campagnes de plantation du milieu du 19^e siècle), dans presque tous les peuplements visités, certifie l'origine naturelle des « plus vieux » arbres. Mais des plantations anciennes, sur de grandes surfaces ou en complément de régénération, ont été réalisées dans presque toutes ces forêts ou dans leurs environs immédiats. Dans ces futaies toutes irrégulières ou jardinées, l'origine naturelle sans pollution génétique

des arbres plus jeunes ne peut donc être garantie. On retrouve presque partout des vestiges de pépinières locales, ayant en général fonctionné au 20^e siècle ; une recherche dans les archives permettrait peut-être d'estimer la quantité de plants produits, leur destination (l'origine des graines était très souvent locale). Dans ces conditions, l'absence de pollution génétique par des individus d'origine inconnue ne peut être garantie.

L'histoire démographique des peuplements actuels de haute altitude des Alpes est particulière : ils sont souvent le résultat d'une recolonisation post-pâturage depuis la fin du 19^e siècle. Ils risquent donc d'être issus d'un faible nombre de semenciers (les arbres isolés des pré-bois) et d'être composés d'une juxtaposition de groupes de tiges apparentées (même mère, pères éventuellement différents), résultat d'une dispersion limitée des graines autour de ces arbres préexistants isolés.

24 unités conservatoires retenues

En dépit de certaines incertitudes, les 24 unités conservatoires choisies (tableau 2 et figure 4) appartiennent aux 4 groupes génétiques plus ou moins différenciés (colonne « régions ») identifiés en France. Étagées de 600 à 1 900 m en versants généralement frais, elles reçoivent de 800 à 2 000 mm de précipitations annuelles. Six d'entre elles sont incluses dans des sites Natura 2000 et 6 dans des espaces protégés (réserves naturelles, parcs nationaux, RBD).

Une démarche à affiner

Ce travail de sélection des unités conservatoires doit être complété, à partir de 2007, sur différents points :

- définir avec précision les unités de gestion qui constitueront

la zone centrale (le noyau) d'une part, la zone périphérique ou zone tampon (qui doit assurer le relatif isolement du noyau du point de vue des pollutions génétiques sous forme de flux de pollen provenant d'individus non autochtones issus de reboisement) d'autre part ;

- caractériser les habitats naturels présents dans ces unités conservatoires afin de vérifier si ce réseau couvre, en l'état, la gamme des habitats naturels présents en France (encadré) ; dans la négative, des unités conservatoires complémentaires pourraient être recherchées ;

- mieux quantifier le nombre d'arbres reproducteurs dans la zone centrale de chaque unité conservatoire afin d'éviter d'avoir une base génétique trop étroite ; seuls les cas de milieux naturellement réduits en surface (tourbières, zones à sol gelé, marges méridionales) bénéficieraient d'un seuil minimum de semenciers plus faible ;

- compléter les données sur l'historique de chaque unité et sur l'origine des boisements riverains, afin d'éviter le plus possible tout risque de sélection de peuplements non autochtones ou mixtes (autochtones et allochtones) et identifier d'éventuelles fluctuations passées des effectifs de reproducteurs ;

- définir une charte de gestion des unités conservatoires qui combine traitements sylvicoles et conservation dynamique de la diversité génétique des peuplements en tenant compte de la forte intensité des flux de pollen et de graines et de la faible structuration spatiale de la diversité observée au sein des peuplements d'épicéa commun (Leonardi et al. 1996).

Enfin, la sélection d'unités conservatoires hors zones d'autochtone (Massif Central, Pyrénées) n'est pas exclue. Des boisements de seconde génération, manifestement bien adaptés à des conditions pédoclimatiques différentes de celles de l'aire naturelle, peuvent en effet représenter un potentiel adaptatif intéressant et à ce titre constituer des ressources génétiques originales.

Et la conservation *ex situ* ?

Il n'existe pas de véritable programme de conservation *ex situ* des ressources génétiques françaises d'épicéa commun. Cependant, les collections de clones INRA et AFOCEL gérées dans le cadre des programmes d'amélioration génétique et de création variétale conduits dans les années 1970-1990, représentent un échantillon de ces ressources qui participe à la conservation des ressources génétiques (Arbez, 1987).

Par ailleurs, un ensemble de 68 clones, copies végétatives greffées d'épicéas columnaires (photo) repérés en 1975-76 dans 14 forêts du Jura, du Doubs et de l'Ain entre 1 200 et 1 400 m d'altitude, est planté sur 8 hectares dans le Lot. Ce dispositif constitue une source de graines unique de ce phénotype très particulier également présent dans les unités conservatoires de Haute Joux et du Massacre. Enfin, le verger à graines « Chapois », ensemble de 62 descendances d'arbres sélectionnés en peuplement sur la base de la densité du bois et de la tardiveté du débourrement, et installé dans le Lot sur 9 hectares, représente désormais la seule source de graines de ce peuplement quasiment disparu.



F. Plancheron, ONF

Au centre, épicéa à port colonnaire en forêt de La Pesse

Françoise PLANCHERON

ONF – DT Rhône-Alpes
francoise.plancheron@onf.fr

Alain VALADON

ONF – Conservatoire génétique des
arbres forestiers Orléans
valadon@onf.fr

Bruno FADY

Unité des recherches forestières
méditerranéennes
INRA Avignon
fady@avignon.inra.fr

Bibliographie

ACHERE V., FAVRE J.M., BERNARD G., JEANDROZ S., 2005. Genomic organization of molecular differentiation in Norway spruce (*Picea abies*). *Molecular Ecology*, vol. 14, n° 10, pp. 3191-3201

ARBEZ M., 1987. Les ressources génétiques forestières en France. Tome 1 : Les conifères. Paris : INRA-BRG. 236 p.

BALSEMIN E., COLLIN E., 2004. Conservation in situ des ressources génétiques des arbres forestiers en France métropolitaine. *Ingénieries*, n°40, pp. 51-60

BARTOLI M., 2003. La dynamique naturelle de l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karts.) dans les Pyrénées françaises. *Acta Botanica Barcinonensia*, n°49, pp. 281-290

BUCCI G., VENDRAMIN G.G., 2000. Delineation of genetic zones in the european Norway spruce natural range: preliminary evidence. *Molecular Ecology*, vol. 9, n° 7, pp.923-934

COLLIGNON A.M., FAVRE J.M., 2000. Contribution to the postglacial history at the western margin of *Picea abies* natural area using RAPD markers. *Annals of Botany*, vol. 85, n° 6, pp. 713-722

COLLIGNON A.M., VAN DE SYPE H., FAVRE J.M., 2002. Geographical variation in random amplified polymorphic DNA and quantitative traits in Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 32, n° 2, pp. 266-282

IFN, 2006. La forêt française : les résultats de la campagne de levé 2005. Nogent-sur-Vernisson : IFN. 113 p.

JEANDROZ S., COLLIGNON A.M., FAVRE J.M., 2004. RAPD and mtDNA variation among autochthonous and planted populations of *Picea abies* from the Vosges mountains (France) in reference to other French populations. *Forest Ecology and Management*, vol. 197, n° 1-3pp. 225-229

LEONARDI S., RADDI S., BORGHETTI M., 1996. Spatial autocorrelation of allozyme traits in a Norway spruce (*Picea abies*) population. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 26, n° 1, pp. 63-71

RAVAZZI C., 2002. Late Quaternary history of spruce in southern Europe. *Review of Palaeobotany & Palynology*, vol. 120, n° 1, pp.131-177

SCOTTI I., VENDRAMIN G.G., MATTEOTTI L.S., SCARPONI C., SARI-GORLA M., 2000. Postglacial recolonization routes for *Picea abies* K. in Italy as suggested by the analysis of sequence-characterized amplified region (SCAR) markers. *Molecular Ecology*, vol. 9, n° 6, pp. 699-708

SKROPPA T., 2003. EUFORGEN Technical guideline for genetic conservation and use for Norway spruce (*Picea abies*). Rome : International Plant Genetic Resources Institute. 6 p.

VAN DER KNAAP W.O., VAN LEEUWEN J.F.N., FINSINGER W., GOBET E., PINI R., *et al.*, 2005. Migration and population expansion of *Abies*, *Fagus*, *Picea* and *Quercus* since 15000 years across the Alps, based on pollen-percentage threshold values. *Quaternary Science Review*, n°24, pp. 645-680

Pour en savoir plus sur les réseaux de conservation de ressources génétiques forestières, consulter :

- les sites du CGAF et de la DT Auvergne-Limousin sur Intraforêt ONF

- le site du Bureau des Ressources Génétiques (BRG) : <http://www.brg.prd.fr/>
- le site d'EUFORGEN : <http://www.biodiversityinternational.org/networks/euforgen/>

à suivre

n° 19 - hiver 2008

Prochain dossier : exploitation respectueuse des sols
parution : février 2008

Après le dossier du printemps 2005 sur le tassement des sols, nous explorerons les aspects pratiques : engagements de l'ONF en matière de conservation des sols, organisation des chantiers d'exploitation...

Retrouvez RenDez-Vous techniques sur intraforêt

Tous les textes de ce numéro sont accessibles au format PDF dans la rubrique qui lui est désormais consacré dans le portail de la direction technique (Recherche et Développement / Documentation technique). Accès direct à partir du sommaire.

Pour rechercher un article particulier, utilisez le moteur de recherche de la base documentaire

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

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 25
Courriel : rdvt@onf.fr

Pour se procurer RDV techniques :

ONF - Documentation technique
Boulevard de Constance
77300 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 24 - Fax 01 64 22 49 73

